

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Grado en Ingeniería de Tecnologías y
Servicios de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS MIMO DE BANDA ANCHA

Autor: Daniel de Pedro Huecas

Tutor: Bazil Taha Ahmed

JULIO 2020

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS MIMO DE BANDA ANCHA

Autor: Daniel de Pedro Huecas

Tutor: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

JULIO 2020

Resumen

En el presente trabajo se buscaba la implementación de antenas de entrada múltiple salida que trabajasen en la cobertura UWB desde 3.1GHz hasta 20GHz. Además se buscaba obtener una antena que incorporase la adaptación de las bandas destinadas a la tecnología WiFi (2.4GHz) y la tecnología GSM y LTE (1.8GHz) y se llevase al ámbito de la tecnología MIMO.

Se tendrán en cuenta una serie de parámetros y características propias antena, y se orientará el diseño en base a ello.

El diseño se estructuró para comenzar diseñando un elemento resonante con dichas especificaciones, y posteriormente el diseño de estructura múltiple entrada múltiple salida (en inglés *Multiple-input Multiple-output*)(MIMO) como array de varias antenas. En el diseño MIMO se buscó en todo momento mantener las especificaciones del primer diseño, buscando siempre el máximos aislamiento entre puertos.

Para buscar los aislamientos necesarios, se diseñaron una serie de barreras sólidas para buscar el máximo aislamiento entre elementos resonantes.

Por último se pretendía construir los diseños en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid, pero debido a la situación vivida por el COVID-19 no se ha podido realizar dicha parte del proceso.

Palabras Clave

UWB, Multiband, GSM, LTE, WiFi, aislamiento, barrera, antena.

Abstract

In this Bachelor Thesis, several MIMO antennas were designed to be implemented and constructed. Furthermore, antennas were designed to be functional in the UWB from 3.2 GHz to 20 GHz. Also, the bands incorporated to the design were the bands for WiFi technology (2.4 GHz) and LTE and GSM (1.8 GHz).

In this project, several characteristics of antennas as a whole will be taken into account in order to proceed with the present design.

In order to achieve such objectives, the designed was structured in several phases. First, the objective was to design our single UWB element that incorporated both bands previously cited. In order to continue with the project, we designed the MIMO arrays with the isolation enhancing as a main objective.

To achieve such high isolation coefficients, we designed solid barriers in both sides of our design.

Finally, we planned on constructing the designs at the EPS laboratory of printed circuits. However, the COVID-19 situation made it non-viable.

Key words

UWB, Multiband, GSM, LTE, WiFi, isolation, barrier, antenna.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia todo el apoyo que me han ofrecido a lo largo del curso del grado. A mi padre por impulsarme a estudiar ingeniería y a mi madre por enseñarme a no rendirme. Gracias a mi hermano Nacho por ser el apoyo incondicional en este año tan duro para mí y gracias a mi hermana Bea por escucharme y apoyarme siempre que lo he necesitado. Ha sido un camino duro hasta conseguir llegar aquí y he de admitir que me han asaltado las dudas más de una vez.

También me gustaría agradecer a mi tutor Bazil su apoyo y lo mucho que he aprendido, además de su plena disponibilidad en el desarrollo de este trabajo. Además querría agradecer a todo el grupo de radiofrecuencia de la EPS por impulsarme al diseño de la rama de radiofrecuencia en telecomunicaciones.

Gracias de corazón,

Daniel de Pedro Huecas

Julio 2020

Índice general

Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organización de la memoria	2
2. Estado del arte	3
2.1. Conceptos teóricos	3
2.2. Teoría de antenas	3
2.3. Parámetros S	4
2.4. Tecnología MIMO	6
2.5. Tecnologías de interés	6
2.6. Tecnología microstrip	8
3. Sistema propuesto	9
3.1. Introducción	9
3.2. Bandas de diseño	9
3.3. Ancho de banda	10
3.4. Adaptación y aislamiento	10
3.5. Requisitos	10
3.6. Limitaciones	11
4. Diseño de antenas	12
4.1. Introducción	12
4.2. Diseño de un elemento	12
4.3. Diseño de antena MIMO de dos elementos	20
4.4. Diseño de antena MIMO de cuatro elementos	28
5. Conclusiones y trabajo futuro	37

Glosario de acrónimos	38
Bibliografía	39
A. Resonancia	41
B. Diagramas de radiación en tres dimensiones	42
C. Detalle de resultados	46
D. Diseños a muy alta frecuencia	48

Índice de Figuras

2.1. Esquema de un sistema de comunicación por el espacio libre. Recuperada de [1] .	4
2.2. Esquema de dipolo con onda incidente y onda reflejada en su puerto.	5
2.3. Espectro de frecuencia y potencias transmitidas	7
2.4. Esquema de estructura microstrip. Imagen recuperada de [1]	8
3.1. Diagrama indicativo de los criterios buscados para la banda UWB	11
4.1. Detalle del diseño de un elemento en sus dos caras	14
4.2. Adaptación	15
4.3. Diagramas de radiación a 1.8 GHz para el plano E y plano H respectivamente . .	17
4.4. Diagramas de radiación a 2.45GHz para el plano E y plano H respectivamente . .	17
4.5. Diagramas de radiación a 4GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	17
4.6. Diagramas de radiación a 7GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	18
4.7. Diagramas de radiación a 10GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	18
4.8. Diagramas de radiación a 15GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	18
4.9. Primer diseño de antena de un elemento y sus resultados asociados	19
4.10. Segunda etapa de diseño de antena de un elemento y sus resultados asociados . .	19
4.11. Tercera etapa de diseño de antena de un elemento y sus resultados asociados . . .	19
4.12. Diseño de dos elementos de la cara superior	21
4.13. Diseño de dos elementos de la cara inferior	21
4.14. Adaptación del puerto 1 del diseño de 2 elementos	22
4.15. Transmisión al puerto 1 del diseño de 2 elementos	22
4.16. Representación de todos los parámetros	23
4.17. Diagramas de radiación a 1.8GHz para el plano E y plano H respectivamente . .	24
4.18. Diagramas de radiación a 2.45GHz para el plano E y plano H respectivamente . .	24
4.19. Diagramas de radiación a 4GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	24
4.20. Diagramas de radiación a 7GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	25
4.21. Diagramas de radiación a 10GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	25
4.22. Diagramas de radiación a 15GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	25
4.23. Primera etapa de diseño de antena de dos elementos	26

4.24. Resultados primera etapa de diseño de antena de dos elementos	26
4.25. Segunda etapa de diseño de antena de dos elementos	26
4.26. Resultados segunda etapa de diseño de antena de dos elementos	27
4.27. Tercera etapa de diseño de antena de dos elementos	27
4.28. Resultados tercera etapa de diseño de antena de dos elementos	27
4.29. Esquema primera cara diseño de 4 elementos	29
4.30. Esquema segunda cara diseño de cuatro elementos	30
4.31. Adaptación al puerto 1 del diseño de cuatro elementos	31
4.32. Transmisión al puerto 1 del puerto 2 para diseño de cuatro elementos	31
4.33. Transmisión al puerto 1 del puerto 3 para diseño de cuatro elementos	32
4.34. Transmisión al puerto 1 del puerto 4 para diseño de cuatro elementos	32
4.35. Diagramas de radiación a 1.8GHz para el plano E y plano H respectivamente . .	33
4.36. Diagramas de radiación a 2.45GHz para el plano E y plano H respectivamente . .	33
4.37. Diagramas de radiación a 4GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	33
4.38. Diagramas de radiación a 7GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	34
4.39. Diagramas de radiación a 10GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	34
4.40. Diagramas de radiación a 15GHz para el plano E y plano H respectivamente . . .	34
4.41. Primera etapa de diseño de antena de cuatro elementos	35
4.42. Resultados tercera etapa de diseño de antena de cuatro elementos de puertos 1 y 2	35
4.43. Resultados primera etapa de diseño de antena de cuatro elementos de puertos 3 y 4	35
4.44. Segunda etapa de diseño de antena de cuatro elementos	36
4.45. Resultados segunda etapa de diseño de cuatro elementos	36
4.46. Detalle barrera horizontal cara superior	36
A.1. Modelo de línea de transmisión aplicada a antenas impresas. Recuperada de [1] .	41
B.1. Diagramas de radiación 3D a 1.8 GHz y 2.45 GHz respectivamente	43
B.2. Diagramas de radiación 3D a 4GHz y 7GHz respectivamente	43
B.3. Diagramas de radiación 3D a 10GHz y 15GHz respectivamente	43
B.4. Diagramas de radiación 3D a 1.8GHz y 2.45GHz respectivamente de diseño de dos elementos	44
B.5. Diagramas de radiación 3D a 4GHz y 7GHz respectivamente de diseño de dos elementos	44
B.6. Diagramas de radiación 3D a 10GHz y 15GHz respectivamente de diseño de dos elementos	44
B.7. Diagramas de radiación 3D a 1.8GHz y 2.45GHz respectivamente de diseño de cuatro elementos	45
B.8. Diagramas de radiación 3D a 4GHz y 7GHz respectivamente de diseño de cuatro elementos	45

B.9. Diagramas de radiación 3D a 10GHz y 15GHz respectivamente de diseño de cuatro elementos	45
C.1. Detalle de adaptación	46
C.2. Detalle de adaptación	47
C.3. Detalle de transmisión	47
D.1. Adaptación al puerto 1 del diseño de cuatro elementos	48
D.2. Transmisión al puerto 1 del puerto 2 para diseño de cuatro elementos	49
D.3. Transmisión al puerto 1 del puerto 3 para diseño de cuatro elementos	49
D.4. Transmisión al puerto 1 del puerto 4 para diseño de cuatro elementos	50

Índice de Tablas

4.1. Parámetros de interés del diseño	13
4.2. Dimensiones en la cara superior de diseño de 1 elemento	14
4.3. Dimensiones en la cara inferior de diseño de 1 elemento	15
4.4. Dimensiones en la cara superior de diseño de 2 elementos	21
4.5. Dimensiones en la cara inferior de diseño de 2 elementos	22
4.6. Dimensiones en la cara superior de diseño de 4 elementos	30
4.7. Dimensiones en la cara inferior de diseño de cuatro elementos	31

1

Introducción

1.1. Motivación

La tecnología *Multiple-input Multiple-output*(MIMO), que aprovecha la forma de la propagación de la señal con el objetivo de obtener mejores transferencias de información, en los últimos años se ha encontrado en un auge de investigaciones y desarrollos. Es uno de los principales objetivos de la ingeniería de microondas de los últimos años dados sus buenos resultados de tasa de transmisión y su bajo coste en el caso de antenas impresas.

En nuestro caso, la tecnología *Ultra Wide-Band*(UWB) fue de gran interés dado el constante impulso hacia la transmisión hacia frecuencias más altas, las tasas de interferencia bajas y el aprovechamiento de las reflexiones que emplea la tecnología MIMO. Además, debido a tecnologías muy populares como la ampliamente conocida tecnología *WiFi*, y las tecnologías *Global System for Mobile communications*(GSM) Y *Long Term Evolution*(LTE), se buscó la unión de la tecnología UWB con la tecnología de antenas multibanda.

En el presente trabajo, se realizarán los diseños en el software disponible en la EPS denominado CST con el objetivo de la posterior construcción de las estructuras *microstrip* diseñadas.

1.2. Objetivos

En el presente diseño se pretende realizar varios diseños de antenas de tecnología MIMO, así como su posterior construcción en los laboratorios habilitados.

Además, se pretende diseñar un elemento que implemente la cobertura UWB (3.1 GHz-20 GHz), así como las bandas diseñadas para WiFi (2.4 GHz), y GSM y LTE (1.8 GHz). Componiendo así un diseño de la tecnología UWB en conjunción con la tecnología multibanda.

Por otra parte se pretende ampliar el diseño a arrays de dos y de cuatro elementos con unas especificaciones de aislamiento asociadas para las bandas UWB y las dos bandas asociadas [2][3].

Por último, se pretenden construir los diseños propuestos, y su posterior medida en los laboratorios.

1.3. Organización de la memoria

En el presente documento se comenzará por la exposición de una serie de conceptos teóricos relativos a las antenas en un sistema de comunicaciones y sus parámetros mas destacables.

Se proseguirá exponiendo las ventajas de las bandas de diseño escogidas y se expondrá la tecnología a la que se encuentra orientada el presente proyecto.

A continuación se detallarán las condiciones y requisitos de los resultados buscados en términos de dimensiones físicas así como parámetros de antena.

Una vez realizado esto, se explicarán los diseños llevados a cabo y las complicaciones surgidas en el proceso.

Se detallarán las conclusiones obtenidas y en los anexos adjuntos se expondrán conceptos relativos al presente trabajo en relación con trabajos futuros.

2

Estado del arte

2.1. Conceptos teóricos

- **Introducción:**

Todas las comunicaciones basadas en la transmisión de ondas por el espacio libre tienen su origen en los famosos desarrollos de las ecuaciones del telegrafista desarrolladas por el físico inglés Oliver Heaviside. Éste último basó su trabajo en los desarrollos de Maxwell y sus desarrollos sobre las ondas electromagnéticas y su comportamiento [4].

El enfoque que tomó Heaviside fue circuital, lo que constituye un caso particular y, en este caso, una simplificación de las ecuaciones de Maxwell. Sus desarrollos los publicó a finales del siglo XIX y, a partir de este trabajo, se llegaría al concepto de lo que hoy se conoce como línea de transmisión. Este avance supondría un gran salto hacia las comunicaciones por espacio libre y la comunicación moderna.

Todo ello conllevó un fuerte estudio posterior por parte del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, el cual desarrolló e implementó el primer receptor moderno, y posteriormente realizaría grandes aportaciones al campo del electromagnetismo.

Hay que comprender que el desarrollo de la línea de transmisión tuvo un impacto global debido a la capacidad de emisión de ondas de tensión y corriente soportadas sobre un modo TEM.

Desde entonces hasta ahora, se han introducido las transmisiones en la banda de microondas y se ha ampliado el rango en el espectro de frecuencia en lo que respecta al orden de GHz.

En este TFG se introducirá a continuación una serie de conceptos generales que serán necesarios para la comprensión del trabajo realizado.

2.2. Teoría de antenas

- **Definición:** Según el IEEE[5] una antena, es todo dispositivo metálico que es capaz de radiar y actuar de receptor de ondas electromagnéticas que además aplica algún tipo de adaptación, ya sea a la entrada o a la salida.[6]

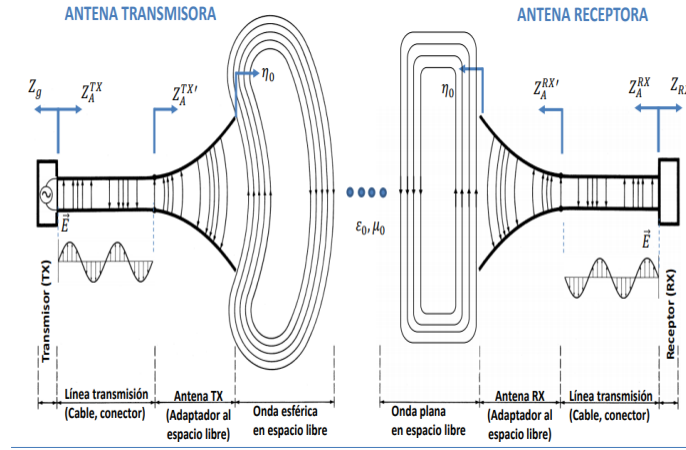


Figura 2.1: Esquema de un sistema de comunicación por el espacio libre. Recuperada de [1]

Una antena toma un papel fundamental en un sistema de comunicación, bien se trate de un transmisor o de un receptor, porque es el punto clave para emitir (radiar) o recibir (captar) una señal de información respectivamente. En la figura 2.1 se detalla un esquema típico con una antena actuando de transmisora y otra en recepción.

En el diseño de antenas impresas, como en el presente trabajo, siempre se toma un punto de vista circuital con el modelo de línea de transmisión para el análisis de una antena y sus parámetros. Detallado en el libro[7]

- **Parámetros de análisis:** Entre los parámetros más importantes a la hora de realizar el análisis de una antena cabe destacar la impedancia de entrada, que es la impedancia que presenta la antena en sus terminales o bien la proporción de voltaje entre intensidad en dichos terminales.[7]

$$Z_a = X_a + R_a \quad (2.1)$$

Dicha impedancia se puede descomponer en dos partes, la parte real y la parte imaginaria. La parte imaginaria será la más relevante a la hora de hablar de la resonancia de una antena, pero la parte real denotada como R_a en la ecuación se compone a su vez de la componente de radiación y la de pérdidas, denotadas con un subíndice r y l respectivamente. Estos desarrollos se pueden ver en las ecuaciones (2.1) y (2.2)

$$R_a = R_r + R_l \quad (2.2)$$

2.3. Parámetros S

Dentro de la emisión de ondas de potencia en sistemas de comunicación, cabe destacar que el modelado de sistemas de radiofrecuencia se suele basar en los parámetros S.

El significado de estos últimos a nivel físico se basa en las ondas de potencia que inciden y se ven reflejadas en un determinado punto de la transferencia de potencia de un sistema.

De tal forma que los parámetros S son el parámetro que relaciona la onda reflejada y la onda incidente en un determinado punto y nos indica la relación entre ambas. Este desarrollo se puede encontrar más en detalle en el libro que se ha empleado para realizar estos esquemas [4].

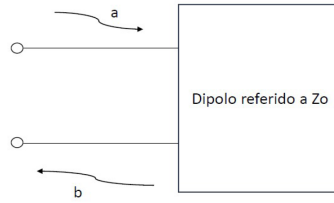


Figura 2.2: Esquema de dipolo con onda incidente y onda reflejada en su puerto.

En la figura 2.2 donde se ha indicado un esquemma de dipolo referido a una impedancia característica Z_0 , si relacionamos la onda de potencia incidente(a) con la onda de potencia reflejada(b) obtenemos la siguiente expresión de parámetro S generalizado para n puertas. Se ve expresada en la ecuación (2.3).

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_n=0, n \neq i} \quad (2.3)$$

De tal forma que acudiendo a la definición de parámetros S en forma matricial, las ondas de potencia en un determinado dispositivo caracterizado con n puertas se podrán expresar de manera general como sigue en la ecuación matricial (2.4).

$$b = Sa \quad (2.4)$$

En este proyecto resultarán tremendamente importantes estos conceptos para poder comprender el concepto de resonancia y adaptación de un antena como conceptos generales.

El desarrollo por el cual se obtienen estas ecuaciones y una explicación más detallada se encuentran en [4]

■ Adaptación y aislamiento:

En cuanto a los parámetros S, en nuestro caso nos interesa conocer qué significado tienen los parámetros en relación a la adaptación de la antena y su aislamiento con respecto a los otros elementos.

Según la definición de parámetro S, se relacionan las ondas de potencia incidentes con las reflejadas, lo cual ya es tremendamente orientativo de como se pueden interpretar los parámetros S de una antena en concreto.

Para nuestro caso, el parámetro S_{11} nos indicará la potencia reflejada en el puerto 1 cuando se excita la puerta 1. Este parámetro es el que nos indicará la adaptación de la antena, dado que es indicativo de la reflexión a la entrada. Es indicativo del coeficiente de reflexión visto en los terminales de la antena, definido en la ecuación (2.5), donde se da supuesta una línea de transmisión de impedancia característica Z_0 conectada a una antena con una impedancia Z_a .

$$\rho = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2.5)$$

Por otra parte, los parámetros S_{nm} son indicativos de las transmisiones entre puertos, lo cual indica el aislamiento entre elementos de la antena.

2.4. Tecnología MIMO

El acrónimo MIMO referencia a los términos en inglés *Multiple-input Multiple-output*, esta tecnología es la que emplea varias antenas a la hora de recibir una señal, así como a la hora de transmitir. [3]

En un inicio, la tecnología MIMO buscaba aprovechar las reflexiones y degradaciones de la señal resultantes de la transmisión inalámbrica para poder incrementar la eficiencia de transmisión de datos.

Para ello, MIMO aprovecha las transmisiones multicamino para reducir el error en un sistema así como aumentar la tasa de transmisión de datos. Debido a los buenos resultados que ha arrojado sobre el campo de la radiofrecuencia, es una tecnología ampliamente utilizada hoy en día.

En el sistema propuesto, dada la situación actual de las comunicaciones inalámbricas, con tasas de transmisión cada vez más demandantes, y la búsqueda de cada vez mayores velocidades de transmisión, decidimos acudir a la muy popular y cada vez más utilizada tecnología MIMO.

2.5. Tecnologías de interés

- **UWB:** La tecnología UWB fue una de las principales motivaciones del proyecto dado su fuerte desarrollo actual y su posible uso dentro de los sistemas de comunicación[8].

El término Ultra-Wideband hace referencia a cualquier transmisión en radio cuya frecuencia central se encuentre por encima de 1.5 GHz o que tenga un ancho de banda de más del 25 % con respecto a la frecuencia central. Además, otra diferencia notable con respecto a otras transmisiones es su modulación, es que en vez de emplear una portadora, la tecnología UWB opta por modular los impulsos directamente, lo cual implica anchos de banda desde muy reducidos hasta de varios GHz.[9]

La principal razón por la que es tan interesante esta tecnología es por su reparto de potencia en transmisión. En esta tecnología ocurre que se ocupan bandas destinadas a otros servicios pero de una manera despreciable en cuanto a interferencias. Para ello, la tecnología UWB emite niveles de potencia muy bajos repartidos a lo largo de bandas de frecuencia muy anchas. Esto provoca que los niveles de interferencia sean del orden de $\mu\text{W}/\text{MHz}$ en cuanto a densidad espectral de potencia.

De tal forma, que con semejante nivel de interferencia, los receptores a los que se pudiera interferir ya estarían lidiando con niveles de interferencia parecidos debido al ruido a su entrada. Sin embargo, también se ha de tener en cuenta que con niveles tan bajos de potencia, no se contemplan transmisiones a largo alcance si no transmisión de corta distancia espacial.

De tal forma que la manera más sencilla de caracterizar esta tecnología es su gran ancho de banda así como sus bajas potencias de transmisión. En el diagrama mostrado en la figura 2.3 se muestran las potencias transmitidas en función del tipo de comunicación y su ancho de banda asociado. Se puede observar que la potencia emitida por los sistemas UWB es significativamente menor que los sistemas de espectro ensanchado y mucho menor que las comunicaciones de banda estrecha. Dentro de la figura detallada, según los estándares del IEEE, el ancho de banda de transmisiones de banda estrecha (B_y en la figura) se encontraría a decenas de KHz, mientras que los anchos de banda de espectro ensanchado (B_x en la figura) se encontraría en el rango de los MHz.

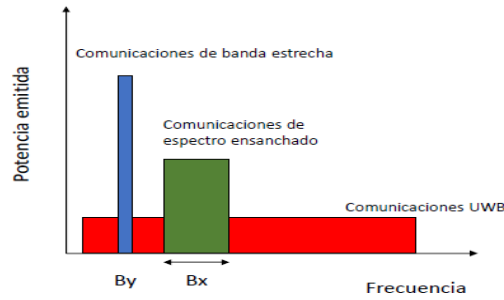


Figura 2.3: Espectro de frecuencia y potencias transmitidas

■ Multiband

La tecnología *multiband*[10] se basa en el principio de resonancia múltiple de una antena. Esto implica que la antena deseada, en caso de que fuera posible, proporcionara una adaptación deseada para dos o más frecuencias o bandas de frecuencia.

En nuestro caso las dos bandas de interés se encuentran en 1.8 GHz y 2.45 GHz. Las cuales fueron elegidas al inicio del proyecto por su importancia para tecnologías como *WiFi* así como LTE y GSM.

- **Wi-Fi** La tecnología Wi-Fi, ampliamente conocida como una de las tecnologías más relevantes en cuanto a las conexiones inalámbricas de dispositivos modernos y comunicaciones, encuentra su definición más precisa en la norma 802.11[11] del instituto de ingenieros eléctricos(IEEE).

Dentro de las comunicaciones reguladas bajo esta norma, todas siguen la comunicación con el aire como medio y con modulaciones denominadas *halfduplex*. La norma ha tenido ampliaciones y versiones a lo largo de los años, desde la versión b ampliamente aceptada hasta la versión j, en las que se modifican alcance y regulación de las tecnologías englobadas en la norma.

La banda de frecuencia objetivo de este trabajo de 2.4 GHz fue regulada en primer lugar en la versión 802.11b en donde se situaba la banda de frecuencia en 2.4 GHz y se establecían velocidades máximas de transferencia para los protocolos de TCP y UDP. Además, cabe destacar la existencia de la tecnología ISM[12] (*Industrial Scientific Medical*), la cual estaba destinada a la transmisión de información en la banda de 2.4 GHz del campo de la industria, de la investigación o del campo sanitario.

La última actualización sobre la banda de 2.4 GHz fue la norma 802.11g en la cual se ampliaban las velocidades máximas de transferencia posibilitando comunicaciones de equipos a varias decenas de kilómetros.

- **GSM y LTE** Las siglas GSM [13] significan *Global System for mobile communications*, y es el estándar más empleado a nivel mundial en comunicaciones móviles. Su desarrollo se basa en la división del tiempo con accesos múltiples para la correspondencia en comunicaciones(TDMA).

Fue desarrollada en la década de los 70 y transmite en varias bandas de frecuencia, transmitiendo voz e información de manera flexible entre ambas. Entre las bandas que emplea para transmitir se encuentran la de 850 MHz, la de 900 MHz, y las de 1800 MHz y 1900 MHz, las cuales resultarán de vital importancia para el proyecto expuesto.

En un mundo cada vez más demandante en el ámbito de las comunicaciones móviles, tecnologías como GSM son de una importancia superlativa dado el ampliamente extendido uso de los móviles en el mundo actual. Con respecto a los estándares de bandas de frecuencias

empleadas en cada zona del mundo, la banda de 1800 MHz es la estandarizada en Europa, así como la de 900 MHz. A diferencia de los estándares europeos, en Estados Unidos se emplea la banda de 1900MHz, por lo que fue descartada en nuestro caso.

En definitiva, decidimos centrarnos en la tecnología GSM para este proyecto dada su relevancia actual en el mundo por su impacto en las comunicaciones móviles, por su más que establecida y regulada estandarización, además de ser capaz de administrar los intercambios de información, GSM es adaptativa a otros estándares de GSM.

En conjunción con la tecnología GSM y teniendo en cuenta el desarrollo actual de las comunicaciones, consideramos la tecnología LTE como otro factor de mucha importancia en este proyecto.[14]

La tecnología LTE es un estándar de comunicaciones inalámbricas que emplea tecnologías como GSM y UMTS para conseguir tasas de transferencia y velocidades muy altas. Tanto como que realizar subidas de archivos a 300 Mbps y llegar a velocidades de 75M bps en comunicaciones.

Dado que la tecnología TLE es una tecnología 4G y el mundo de las comunicaciones modernas cada vez es más exigente en cuanto a requisitos de velocidad y tasa de transferencia, la unión propuesta de la tecnología MIMO y LTE podría ser una muy buena opción.

Dado el aprovechamiento de las propagaciones multicamino por parte de las estructuras MIMO, obteniendo mejores resultados en velocidades y tasas de transferencia, la tecnología LTE podría aprovechar enormemente esta ventaja con el objetivo de buscar los requisitos antes mencionados.

2.6. Tecnología microstrip

La tecnología microstrip ha resultado de vital importancia para el desarrollo de este proyecto. Ha ejercido de base y de factor primario limitante para el desarrollo.

La tecnología microstrip se basa en un dieléctrico con una placa de conductor que actúa de plano de masa y la línea de conductor por encima del dieléctrico. La manera de modelar el modo que se transporta en una línea microstrip sería un modo aproximadamente TEM debido a que no se encuentra rodeada de un solo dieléctrico, lo que constituiría un modo *cuasi_TEM*.

Es una tecnología muy popular en diseño de antenas impresas[15], porque a pesar de presentar grandes pérdidas de dieléctrico y de conductor, resulta una tecnología con muy buenos resultados para su bajo coste. Además cabe destacar la reducción de las longitudes de elementos resonantes debido a la presencia del dieléctrico de diseño.

En la figura 2.4 se detalla un esquema típico de una estructura microstrip vista desde un alzado tradicional.

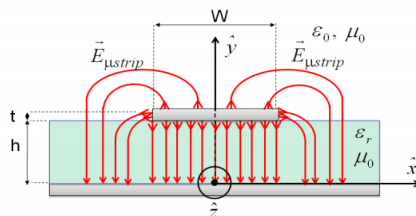


Figura 2.4: Esquema de estructura microstrip. Imagen recuperada de [1]

3

Sistema propuesto

3.1. Introducción

En el siguiente capítulo se detallarán los requisitos del diseño, en términos de tamaño y parámetros de antena. También se detallarán los valores que consideramos aceptables al inicio del proyecto.

3.2. Bandas de diseño

Las bandas resultantes de la unión entre la tecnología multiband y UWB fueron las situadas en 2.45 GHz por su alta popularidad en tecnología WiFi además de otras aplicaciones, y la banda de 1.85 GHz fue escogida por necesidades de tecnologías como GSM y LTE.

Al ser uno de los principales objetivos del diseño propuesto, resultaron de vital importancia en el desarrollo del proyecto propuesto, y en varias fases del diseño debió modificar el planteamiento inicial con el objetivo de la recuperación de las bandas de adaptación.

En el ámbito de la banda UWB buscada, siempre se buscaron bandas de diseño que abarcaran desde 3.1 GHz hasta 20 GHz, sin que la frecuencia de inicio fuera crítica. Esta banda se escogió en base a los criterios establecidos por la FCC de 2002[16] recogida en el documento referido a las transmisiones UWB, en donde se planteó la región UWB desde 3.1 GHz hasta 10.6 GHz.[16]

3.3. Ancho de banda

En las antenas de parche, como se menciona en el documento, el valor típico para el cual se considera que una antena está adaptada es -10 dB por lo cual los anchos de banda, ya sea expresados en tanto por cien o en frecuencia siguen esa norma para establecer la adaptación de una antena. Esto se muestra en la ecuación (3.1) [7][17]

En antenas de parche los valores típicos en tanto por cien son en torno al 1 %

$$BW = \frac{\Delta f_{-10dB}}{f_{center}} \quad (3.1)$$

En nuestro caso buscábamos ese valor típico o en todo caso una mejora con respecto a esos valores típicos.

3.4. Adaptación y aislamiento

A la hora de definir la adaptación de la antena, podemos acudir a la definición de resonancia referida a los parámetros S anteriormente expuestos.

En lo que se refiere a la adaptación de la antena, se haría referencia a la resonancia de una antena, así como la impedancia que presentaría a dicha frecuencia resonante. En el caso de antenas impresas como la que se ha diseñado, típicamente se considera una banda de adaptación a toda la que se encuentra por debajo de -10 dB, o equivalentemente una R.O.E de 2[18], la cual se puede definir como en la ecuación (3.2).

$$R.O.E = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (3.2)$$

En lo que respecta a aislamiento en la zona UWB, siempre se buscó un aislamiento objetivo de -20 dB, con la zona de entre -15 dB hasta -20 dB evaluable en lo que respecta a su validez, pero nunca considerando aislamientos por encima de -10 dB como aceptables.

En nuestro caso, al tener varias bandas de frecuencia a adaptar, los requisitos han sido especialmente complejos de conseguir, sobre todo en términos de la combinación de aislamiento y adaptación.

3.5. Requisitos

Con un sistema tan ambicioso en función del objetivo final de una antena de cuatro elementos, definimos una serie de requisitos en el diseño final. Estos requisitos van asociados a los parámetros típicos de las antenas de parche y su R.O.E asociada a una antena resonante y también a un aislamiento lo suficientemente alto para los tamaños empleados tan reducidos.

Para las especificaciones, se realizará una distinción entre adaptación S_{nn} del puerto n-ésimo y aislamiento (S_{nm} de cada uno de los puertos). Para ello, al comenzar el diseño, tuvimos que tener en cuenta los anchos de banda necesarios en las bandas de 2.45 GHz y de 1.8 GHz para poder conseguir adaptaciones de -10 dB. Los anchos de banda buscados fueron semejantes a los típicos de una antena de parche, es decir, en torno a un 1 %.

Por otra parte, en lo que respecta al aislamiento, tomamos un objetivo bastante más ambicioso buscando aislamientos de al menos -20 dB en la zona de UWB y de -15 dB en las bandas

inferiores. Además en zonas por debajo de la cobertura UWB, exceptuando las zonas de las bandas, el aislamiento no se consideró relevante a nivel de ser necesarios 20 dB.

En la figura 3.1 se detallan las zonas que consideramos válidas (verde), potencialmente aceptables (ámbar) y por último rojas, las cuales no se consideraron lo suficientemente aptas para la zona UWB. Con estos requisitos se buscaba que potencialmente la totalidad de la banda de UWB presentara coeficientes de aislamiento por de bajo de -20dB, pero en caso de obtener aislamientos algo inferiores, entre -15 dB y -20 dB, se evaluaría el caso particular.

En el caso de las bandas de 1.8 GHz y de 2.4 GHz los requisitos no podían ser tan estrictos dado el cambio de adaptación en los parámetros, así que optamos por aceptar parámetros de aislamiento un poco menos exigentes que los -20 dB de aislamiento para la cobertura UWB. Por norma general, al encontrarse próximas entre sí en espacio frecuencial, consideramos un más que buen resultado a -15 dB de aislamiento, y un resultado válido a -13 dB.

Por último cabe destacar que buscamos estos aislamientos debido a la importancia del aislamiento de señales así como la prevención de la impedancia de la antena. Estos caso son especialmente relevantes dado que se diseña para implementar una banda de tecnología móvil[19].

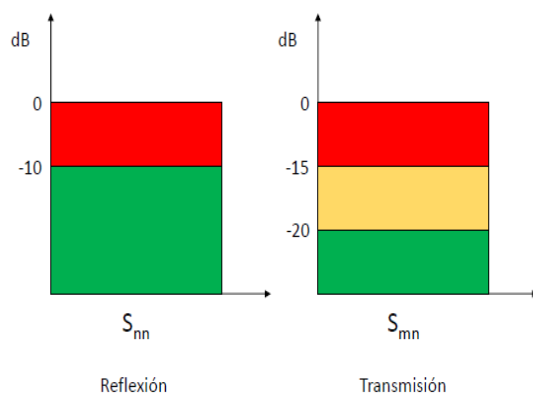


Figura 3.1: Diagrama indicativo de los criterios buscados para la banda UWB

3.6. Limitaciones

Dado que el diseño a continuación se encuentra orientado hacia la implementación en comunicaciones móviles, las limitaciones físicas son evidentes, de manera que físicamente el diseño se encontraría limitado a unas dimensiones máximas aproximadas a las de un teléfono móvil moderno.

Por otra parte, dentro de las limitaciones cabe destacar que dado que el presente diseño se pretende que sea construido, las dimensiones empleadas tenían que ser realizables en el laboratorio.

4

Diseño de antenas

4.1. Introducción

En este capítulo se va a exponer el desarrollo del diseño que se ha realizado. Se comentarán los distintos problemas que han surgido a la hora de desarrollar el trabajo y las soluciones que se obtuvieron para solucionar estos últimos.

La estructura de este capítulo se va a dividir en las distintas etapas que siguió el trabajo en su desarrollo, comenzando por el diseño de un elemento, siguiendo por el desarrollo del diseño de dos elementos y concluyendo con el diseño de cuatro elementos.

4.2. Diseño de un elemento

En el cominezo de este proyecto, el enfoque que tomamos fue comenzar por diseñar un elemento propio y conseguir las especificaciones que buscábamos en el diseño, y a partir de ahí proseguir con el trabajo.

En cuanto al desarrollo, comenzamos obteniendo la banda de UWB que buscábamos (comenzaba en 3.1 GHz hasta 20 GHz) con la adaptación deseada. Una vez conseguimos lo anterior, comenzamos a trabajar sobre las dos bandas que buscábamos, y en el proceso modificamos la resonancia de la antena UWB tanto para una banda como para la otra banda objetivo. En un inicio, optamos por emplear directamente un taper desde la base del conector hasta el elemento radiante [20]. Optamos por esta decisión con el objetivo de obtener una mejor respuesta, lo cual era vital en nuestro caso dadas las tres especificaciones bastante exigentes de las bandas de adaptación. Nos podríamos haber planteado el desarrollo con una línea de transmisión como alimentación de la estructura de monopolo, pero dados los resultados observados optamos por emplear un *taper*.

Cabe destacar que se tuvo que tener en cuenta que en estas estructuras tipo microstrip, al ser un medio con dos medios dieléctricos, siendo el aire y el material, el comportamiento de las longitudes de conductor perfecto es ligeramente complejo. Ocurre que los valores de la constante dieléctrica relativa ε_r oscilan entre el del material y el del aire, por lo que en ocasiones a pesar de realizar cálculos en base a la constante dieléctrica relativa, los resultados varían con respecto a éstos últimos.[4][21]

En el diseño empleamos un material dieléctrico de 1.524 mm de espesor con constante dieléctrica relativa ε_r de 3.5 y una constante de permeabilidad magnética relativa μ_r de 1. Además cabe destacar que el espesor del conductor perfecto empleado para todo el diseño es de 0.03 mm. Todo ello se detalla en el cuadro 4.1.

Parámetros de interés	
Parámetro	Valor
ε_r	3.5
μ_r	1
Espesor dielectric	1.524 mm
Espesor PEC	0.03 mm

Cuadro 4.1: Parámetros de interés del diseño

Cabe destacar que se escogió una constante dieléctrica relativa de este valor con el objetivo de obtener un diseño no excesivamente caro. Ocurre que los materiales con constantes dieléctricas relativas muy altas propician diseños más reducidos en dimensiones, como se puede observar en la expresión de la longitud de onda en la ecuación (4.1). Pero puede producirse una desmejora en términos de banda de adaptación con valores muy altos de ε_r .

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4.1)$$

Para el diseño de las bandas de 1.8 GHz y 2.4 GHz optamos por emplear longitudes semejantes a la mitad de la longitud de onda[22]. Siguiendo la ecuación 4.1 obtendríamos una longitud de onda de 89 mm aproximadamente para la banda de 1.8 GHz y 66 mm para la banda de 2.4 GHz. Debido al acoplamiento producido por el resto de componentes de la antenna impresa y por el dieléctrico, la longitud efectiva variará ligeramente[7]. Además, cabe destacar que en el diseño de antenas impresas el comportamiento de la constante dieléctrica relativa anteriormente mencionado, se ve afectado además por los acoplamientos producidos por la propia estructura radiante. Por ello, se hubo de realizar varias pruebas en lo que respecta a la longitud efectiva, hasta que se obtuvo la respuesta deseada. En el caso de la banda nominal de 1.8 GHz se pretendía implementar una longitud próxima a la mitad de la longitud de onda, pero se redujo hasta 40.65 mm debido a lo anteriormente citado.

En dicho diseño empleamos varios conceptos a tener en cuenta, en primer lugar, la decisión que tomamos de emplear un elemento circular como elemento unitario con el motivo de obtener una estructura impresa circular con cobertura UWB. Los desarrollos intermedios que se realizaron hasta conseguir el elemento UWB propio se detallan en la figura 4.9 con sus resultados asociados, en donde se puede apreciar que la región UWB se encontraba aún sin adaptar, pero que contribuiría al desarrollo del elemento unitario.

En segundo lugar, se decidió emplear una estructura de taper de adaptación debido a que siempre ofrece resultados mejores para antenas resonantes UWB[20]. A partir de ahí, añadimos el plano de masa, y modificamos la impedancia de la antenna para que fuera resonante a las bandas deseadas.

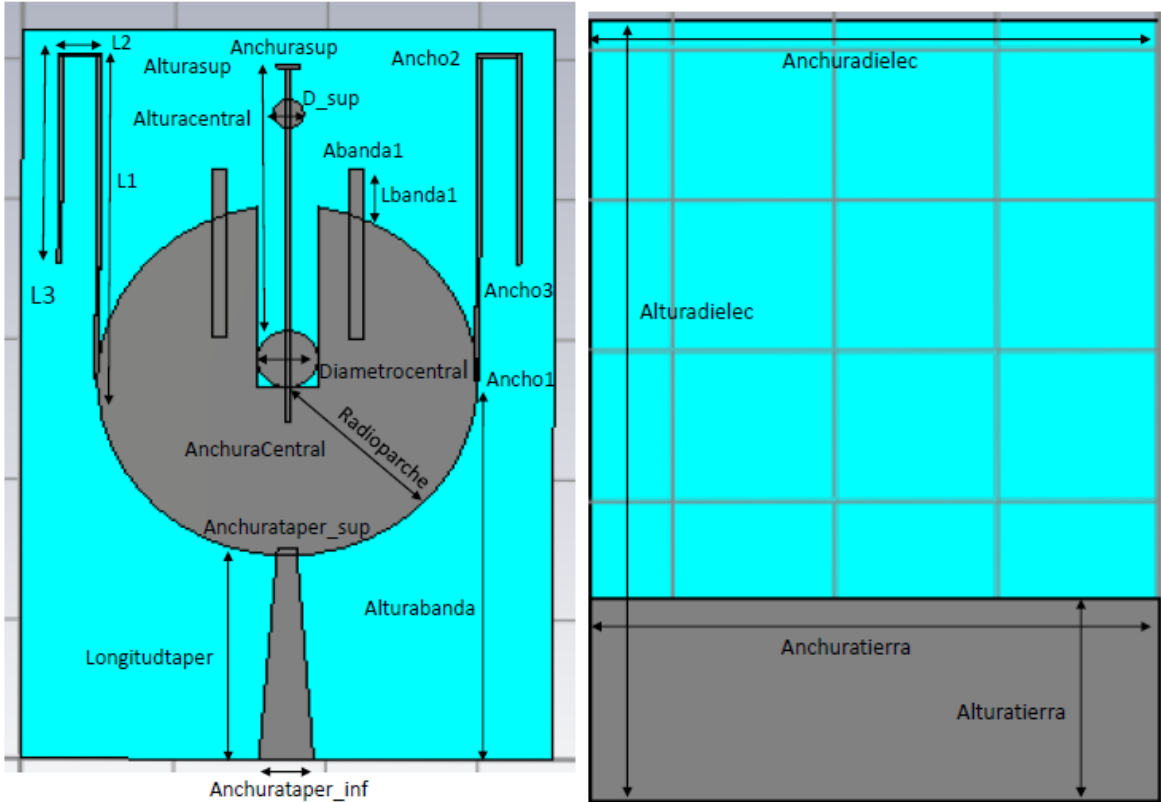


Figura 4.1: Detalle del diseño de un elemento en sus dos caras

Dimensiones cara 1	
Variable	Tamaño en mm
Anchurataper_inf	3.6
Anchurataper_sup	1.25
Radioparche	12.5
Diametrocentral	4
Lbanda1	2.5
Abanda1	1
Alturacentral	19
Anchurasup	1.5
AnchuraCentral	0.3
L1	23
L2	2.65
L3	15
Longitudtaper	15
D_sup	2
Ancho1	0.3
Ancho2	0.3
Ancho3	0.3
Alturasup	0.3
Alturabanda	27

Cuadro 4.2: Dimensiones en la cara superior de diseño de 1 elemento

Dimensiones cara 2	
Variable	Tamaño en mm
Anchuradielec	35
Alturadielec	52
Anchuratierra	35
Alturatierra	13.5

Cuadro 4.3: Dimensiones en la cara inferior de diseño de 1 elemento

En la banda de 2.4 GHz al tener la banda de 1.8 GHz de tanta longitud, y por tanto con tal capacidad de acoplamiento, optamos por diseñar con múltiplos menores de la longitud de onda. Optamos por 1/16 de la longitud de onda siendo 4 mm aproximadamente y lo modificamos hasta obtener la banda deseada de 2.4 GHz. Además, empleamos la banda central como apoyo para la banda de 2.4 GHz, dado que en frecuencia se encontraba bastante próxima al comienzo de la cobertura UWB.

En el desarrollo de esta fase del proyecto, se realizaron varias etapas intermedias de diseño, tanto para el diseño de la banda UWB como para el diseño de ambas bandas nominales de 1.8 GHz y de 2.4 GHz. En dicho desarrollo ya habiendo obtenido el diseño de la estructura UWB en solitario, se continuó por el diseño de la banda de 2.4 GHz, y se realizaron una serie de desarrollos intermedios detallados en la figura 4.10 con sus resultados. Debido a estos resultados, se llegó a la conclusión de que empleando bandas de anchura de 0.3 mm se obtenían mejores resultados en términos de la banda de adaptación. Por último se finalizó con la incorporación de la banda de 1.8 GHz, la cual provocó ciertas modificaciones en las longitudes efectivas del diseño resonante, y donde se añadió una circunferencia en la banda central con el objetivo de mejorar la respuesta. Este desarrollo se detalla en la figura 4.11 con sus resultados.

La antena es simétrica con respecto al eje vertical del puerto, por lo que en el detallado de las medidas se ha optado por omitir tamaños con el fin de visualizar las imágenes de mejor manera. Se representan el diseño y sus dimensiones en la figura 4.1 y en los cuadros 4.2 y 4.3

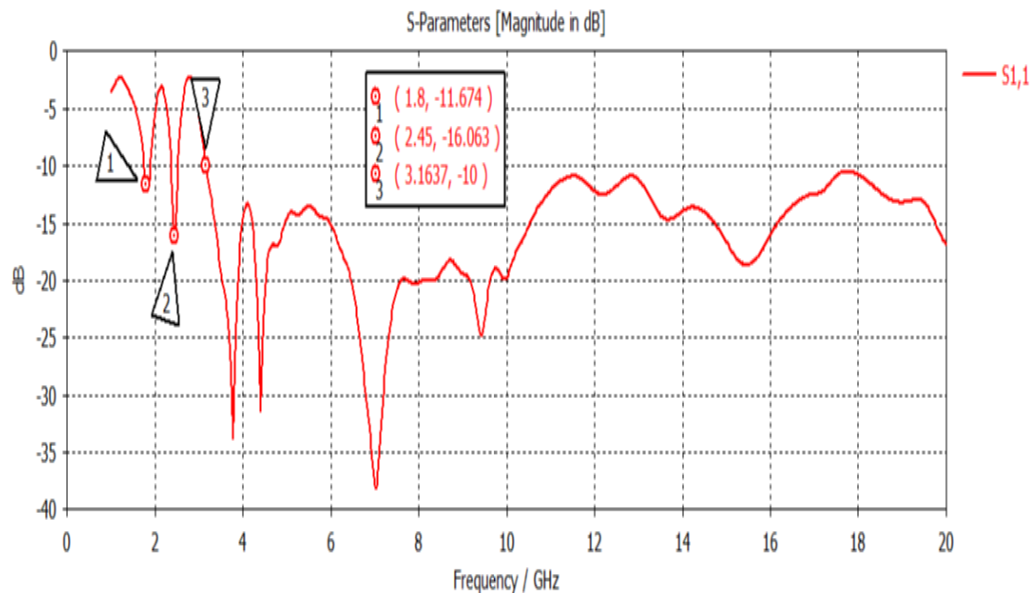


Figura 4.2: Adaptación

Se puede observar que se cumplía con los requisitos especificados de ambas bandas así como que la banda UWB abarcaba desde 3.16 GHz hasta 20 GHz. Esto se puede observar en la figura 4.2. En cuanto a las bandas obtenidas, en los valores nominales de la banda de 1.8 GHz, obtuvimos una adaptación desde 1.75 GHz hasta 1.9 GHz. Para la banda de 2.45 GHz, la adaptación abarcaba desde 2.36 GHz hasta 2.52 GHz. Las bandas obtuvieron unos anchos de banda relativos de un 8.33 % la banda de 1.8 GHz y de un 6.53 % en la banda de 2.45 GHz.

Una vez terminamos el diseño, obtuvimos los diagramas de radiación a una serie de frecuencias que consideramos de interés. Dichas frecuencias fueron las dos bandas objetivo 1.85 GHz y 2.45 GHz, y una serie de frecuencias dentro la cobertura UWB, que fueron 4 GHz, 7 GHz, 10 GHz y 15 GHz. Estas últimas se escogieron con el objetivo de poder observar las diferencias en cuanto a impedancia y a diagrama de radiación del rango de frecuencias UWB.

Cabe destacar que al impedancia vista a 1.8 GHz fue 80 Ohmios, a 2.45 GHz 55.4 Ohmios, a 4 GHz 64 Ohmios, a 7 GHz 49.6 Ohmios, a 10 GHz 46.7 Ohmios y a 15 GHz 58.2 Ohmios.

En los diagramas de radiación de 1.8 GHz tanto para plano E como para plano H de la figura 4.3 cabe destacar que debido a la simetría física de la antena con respecto al eje vertical, el diagrama en el plano E (izquierda) es similar al diagrama de radiación de una antena de parche completamente circular, que a su vez es completamente simétrica. Con respecto al plano H a la misma frecuencia, se ha obtenido el diagrama típico en una antena de parche que crece desde la alimentación hacia el elemento resonante.

De manera similar, en la figura 4.4, siendo el diseño de la segunda banda diseñada, la representación copolar en plano E y plano H es muy similar a la de una antena de parche y a la figura 4.3 en forma, pero varía al haber empleado múltiplos diferentes de la longitud de onda. En la resonancia de las bandas de diseño, los diagramas de radiación son típicamente de esta forma sin plano de masa[23].

Con respecto a la zona UWB, en las frecuencias que escogimos para representar la zona de cobertura, dado que es un ancho de banda mucho más amplio, la resonancia de la antena varía de manera muy apreciable entre 3.2 GHz y 20 GHz. Todo ello se ve reflejado en la representación de los planos E y H de la componente copolar vista en las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 [24].

En los diagramas de radiación 3D del anexo B mostrados en las figuras B.1, B.2, B.3, se ve una representación en tres dimensiones de los planos vistos en las anteriores figuras. En referencia a los diagramas representados, siempre se ha representado la componente copolar dado que es la de mayor interés en el diseño de antenas. La deducción de los planos E y H se debe a que la antena contaba con el puerto definido en el plano XZ y crecía en la dirección Y por medio de la estructura de adaptación taper.

Con respecto a los diagramas de radiación mostrados, se han dado trabajos en los que se pueden realizar estudios así como diseños buscando simetría de radiación[25], pero condicionaría la adaptación, así como los asilamientos obtenidos, de manera que se prefirió obtener un mejor funcionamiento, en vez de una implementación en búsqueda de diagramas simétricos. Estos métodos se basan en muchos casos en antenas fractales de aplicaciones posibles de banda UWB, pero implican un mayor coste en la fabricación así como métodos de impresión extremadamente precisos.[26]

Además, cabe destacar que en las representaciones en tres dimensiones se puede visualizar la manera de radiar del diseño planteado. El campo radiado viaja desde la alimentación por medio de la estructura taper hasta el elemento radiante y a partir de ahí, se produce la radiación mostrada del campo eléctrico. Además, se puede visualizar que a mayor frecuencia, la simetría del campo radiado se hace más dispar.

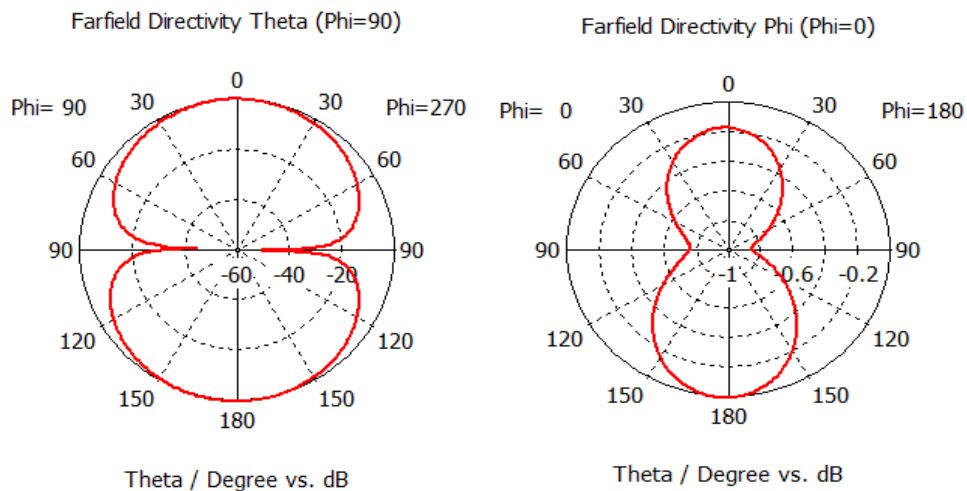


Figura 4.3: Diagramas de radiación a 1.8 GHz para el plano E y plano H respectivamente

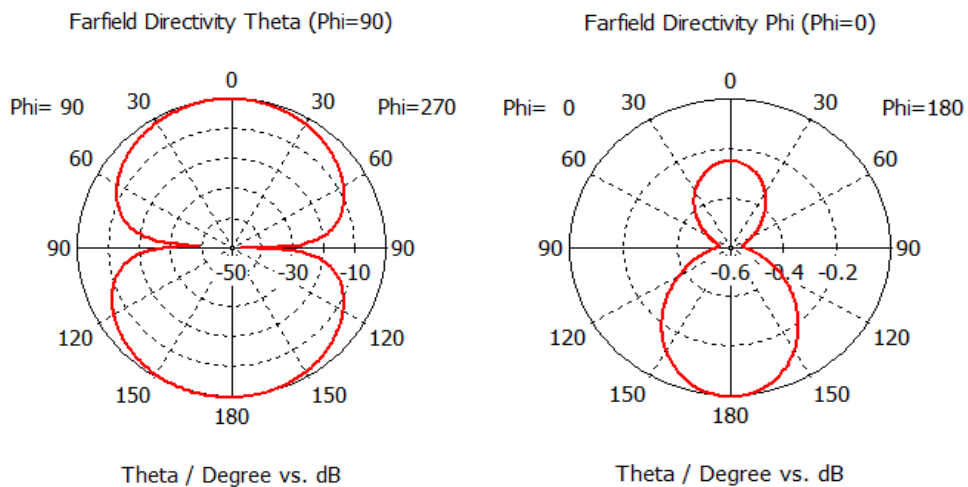


Figura 4.4: Diagramas de radiación a 2.45GHz para el plano E y plano H respectivamente

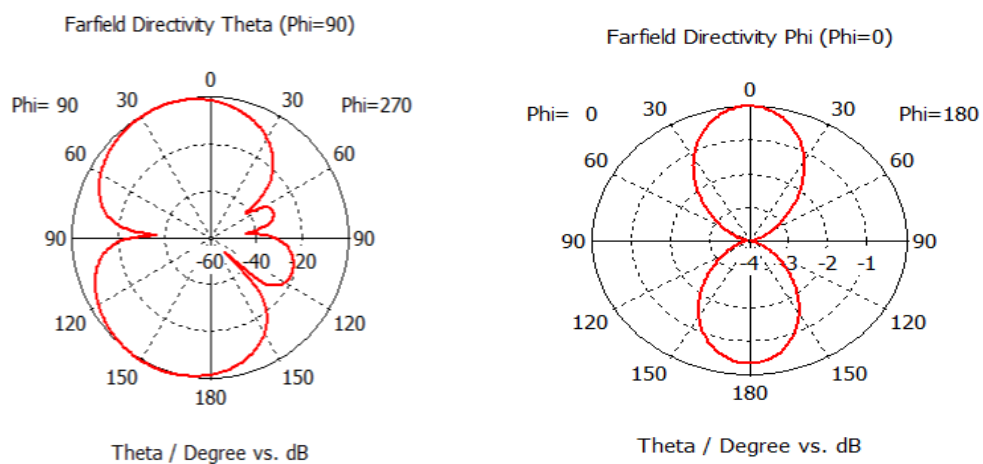


Figura 4.5: Diagramas de radiación a 4GHz para el plano E y plano H respectivamente

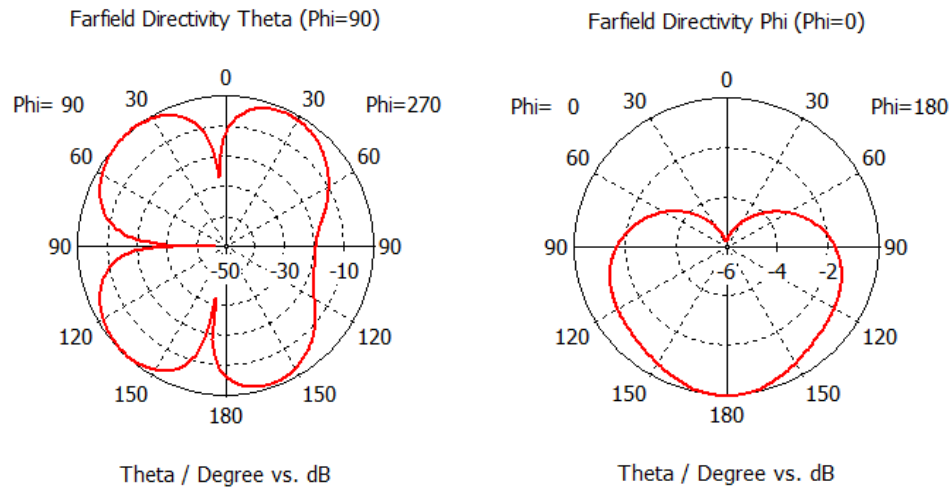


Figura 4.6: Diagramas de radiación a 7GHz para el plano E y plano H respectivamente

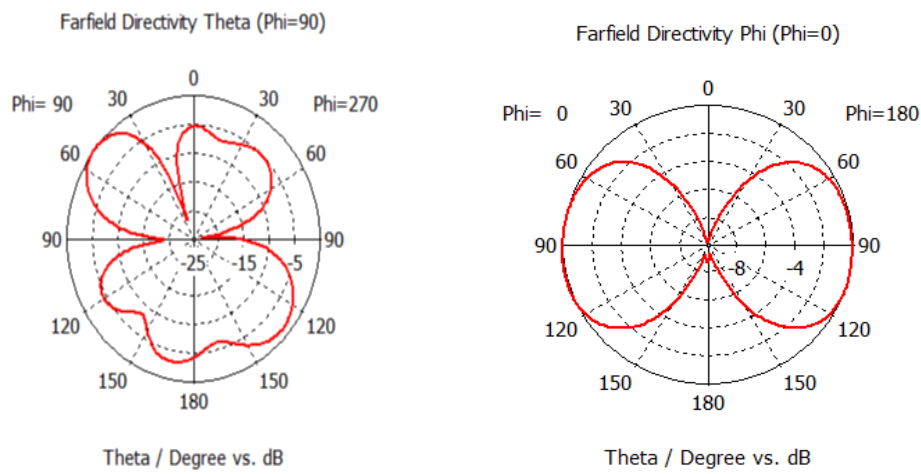


Figura 4.7: Diagramas de radiación a 10GHz para el plano E y plano H respectivamente

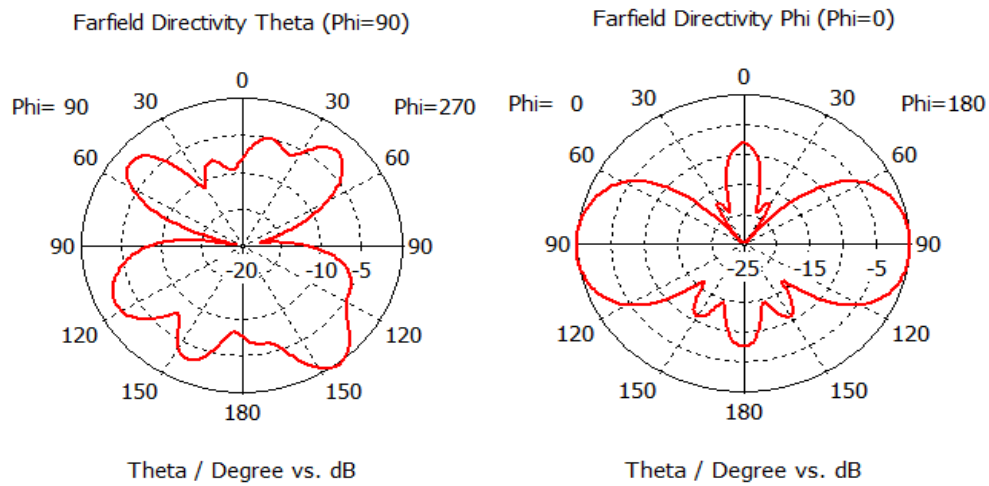


Figura 4.8: Diagramas de radiación a 15GHz para el plano E y plano H respectivamente

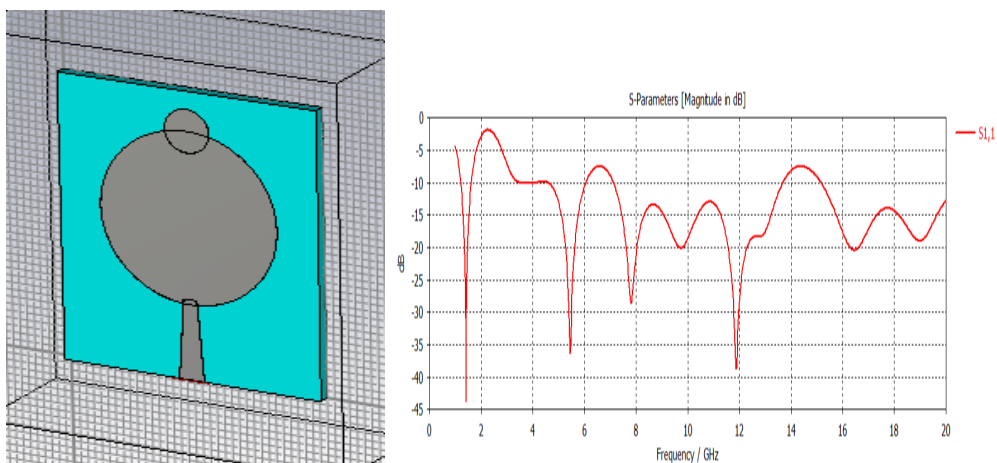


Figura 4.9: Primer diseño de antena de un elemento y sus resultados asociados

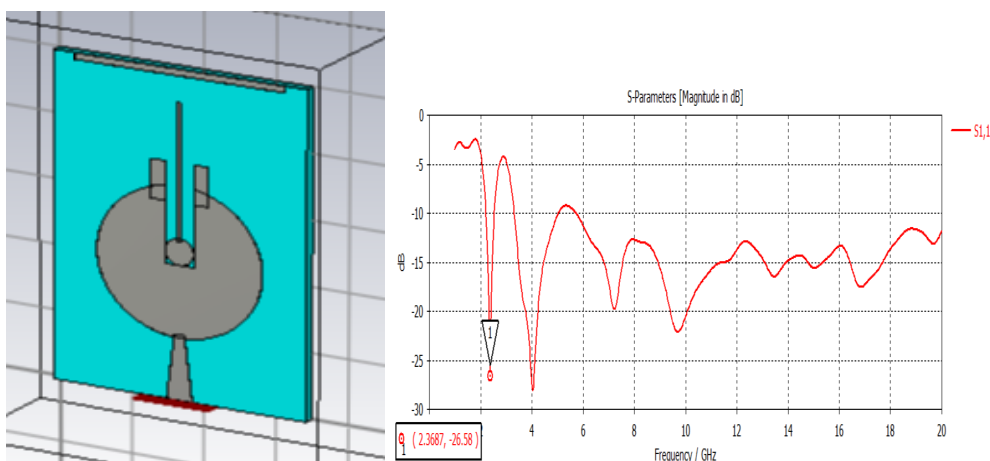


Figura 4.10: Segunda etapa de diseño de antena de un elemento y sus resultados asociados

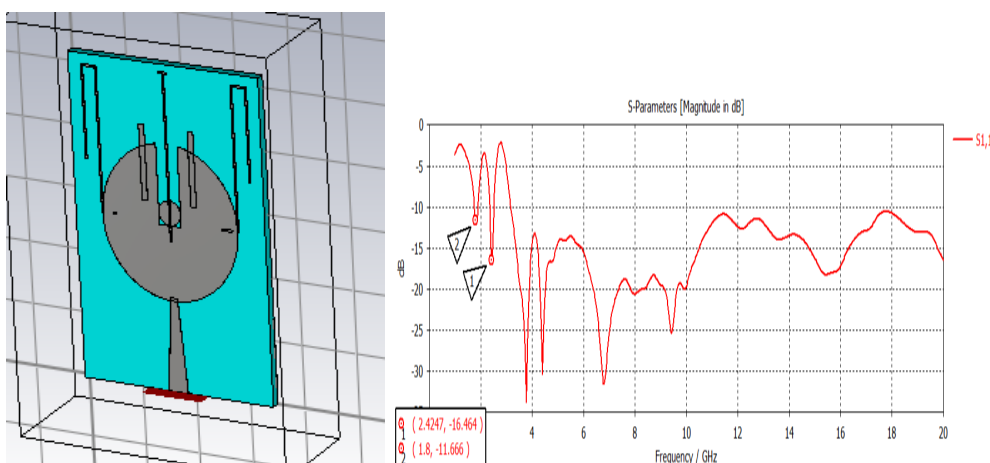


Figura 4.11: Tercera etapa de diseño de antena de un elemento y sus resultados asociados

4.3. Diseño de antena MIMO de dos elementos

Una vez finalizado el diseño de un elemento, se prosiguió incorporando otro elemento, en este caso consideramos diseñar primero la antena de dos elementos con el objetivo de tener un diseño más progresivo y poder realizar todas las etapas de diseño por separado. En este caso tuvimos que tener en cuenta los parámetros de transmisión S_{12} así como el parámetro S_{21} . Aprovechando las características MIMO, cabe destacar que se buscó una mejora de prestaciones en las bandas nominales de 1.8 GHz y de 2.4 GHz.

En este caso para la claridad de representación de la antena físicamente, los elementos que ya se hayan denotado en la anterior imagen 4.1 se volverán a detallar pero no se indicarán en la imagen asociada a esta fase del diseño. Todo ello con el objetivo de una mejor visualización del array planteado.

Además, cabe destacar que si en algún caso la dimensión no se ha visto modificada, no se volverá a detallar en las imágenes asociadas 4.12 y 4.13. Para realizar el diseño, implementamos estructuras compuestas por conductor perfecto para mejorar el aislamiento entre ambos puertos debido a la falta de campo en su interior.

En el caso de las barreras, optamos por emplear una disposición de conductor perfecto entre ambos elementos, porque en caso contrario el acoplamiento era excesivo, y lo mismo ocurre con la cara inferior. Además, realizamos una separación entre los planos de masa para reducir la transmisión entre ambos puertos. Podríamos haber empleado filtros[27] para rechazar bandas, pero optamos por no emplearlas con el objetivo de emplear configuraciones sólidas, dado que la implementación de barreras sólidas era uno de los objetivos del presente trabajo. [28]

En el proceso, se probó la implementación de barreras tanto en la cara superior como en la inferior, cada una por separado. Dado que ambos casos no ofrecían un resultado satisfactorio, se optó por implementar barreras sólidas en ambas caras, pero ello conllevó una modificación de la resonancia de la antena, lo cual fue uno de los problemas que se plantearon en esta fase del diseño. Este proceso se compuso por una serie de diseños, entre los cuales se comenzó suprimiendo una de las bandas de 1.8 GHz y la implementación de barreras solamente en la cara superior, con el objetivo de alcanzar un mejor aislamiento. Dicha decisión fue un error, dado que no se alcanzaron los parámetros de aislamiento, ello se muestra en las figuras 4.23 y 4.24.

Ya descartado ese desarrollo por no conseguir los coeficientes buscados, se buscó un diseño con barreras únicamente en la cara inferior, de nuevo sin restaurar las bandas simétricas de 1.8 GHz. En este caso, las bandas nominales se vieron afectadas por el acoplamiento entre planos de masa y se desplazaron en frecuencia, así como una empeora en prestaciones. Además cabe destacar que se seguían sin conseguir los coeficientes de acoplamiento buscados. Este diseño se muestra en la figura 4.25 y sus resultados en la figura 4.26.

Debido a los resultados previos, se optó por la implementación de barreras sólidas en ambas caras de la estructura de array. Ello conllevó una mejora en aislamiento, pero más tarde se recuperó la simetría de las bandas de 1.8 GHz para obtener de nuevo las bandas nominales. Estos resultados y diseños se muestran en las figuras 4.27 y 4.28. A partir de las barreras en la cara inferior, se desarrolló la estructura final que compondría el array de dos elementos. Además, se dedujo que a pesar de que el acoplamiento en la cara superior con las barreras centrales podría modificar la resonancia de la antena, eran muy necesario el diseño de impedimentos para la transmisión entre puertos en la cara superior.

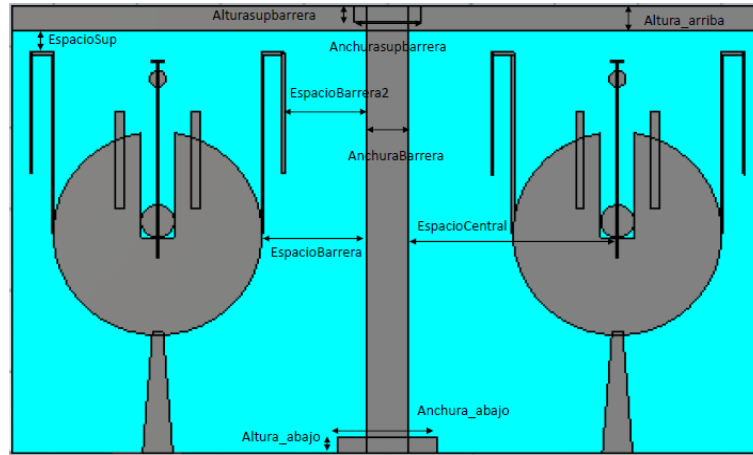


Figura 4.12: Diseño de dos elementos de la cara superior

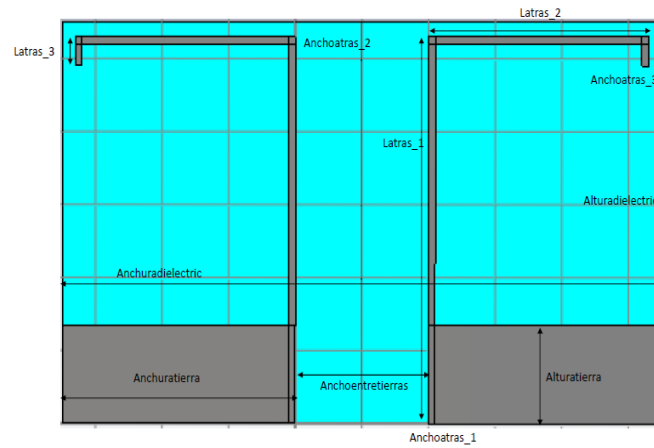


Figura 4.13: Diseño de dos elementos de la cara inferior

Dimensiones cara 1	
Variable	Tamaño en mm
Lc	24
L1	22
Altura_abajo	2
Anchura_abajo	12
EspacioCentral	25
Altura_arriba	3
Alturasupbarrera	2
Anchsupbarrera	22
EspacioBarrera	12.35
EspacioBarrera2	9.85
AnchuraBarrera	5

Cuadro 4.4: Dimensiones en la cara superior de diseño de 2 elementos

Dimensiones cara 2	
Variable	Tamaño en mm
Anchuradielectric	90
Alturadielectric	55
Latras_1	53
Latras_2	33
Latras_3	4
Anchoatras_1	1
Anchoatras_2	1
Anchoatras_3	1
Anchuratierra	35
Alturatierra	13.5
Anchoentretierras	20

Cuadro 4.5: Dimensiones en la cara inferior de diseño de 2 elementos

A continuación se muestran los parámetros de adaptación y de transmisión entre puertos del diseño propuesto.

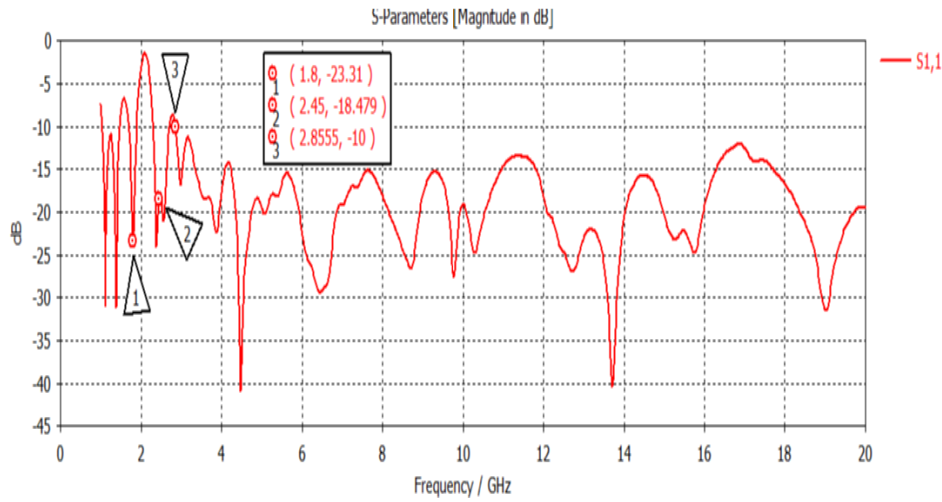


Figura 4.14: Adaptación del puerto 1 del diseño de 2 elementos

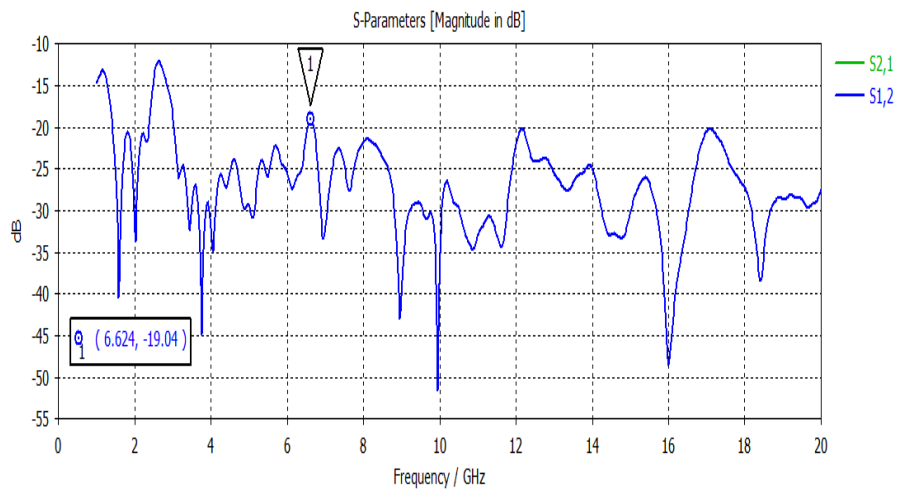


Figura 4.15: Transmisión al puerto 1 del diseño de 2 elementos

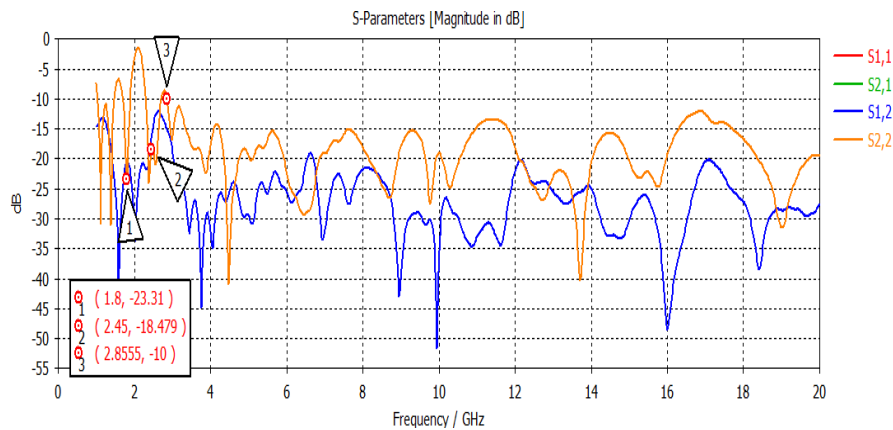


Figura 4.16: Representación de todos los parámetros

Como se puede observar la adaptación de los dos elementos era más que satisfactoria y se obtenían las bandas deseadas. Además de que los anchos de banda obtenidos eran más que notables. Se puede visualizar en la figura 4.14.

En cuanto al acoplamiento, en la banda UWB, tenía la mayor parte de su zona dentro de los criterios de acoplamiento permitidos, y optamos por continuar a pesar de que obtuvieramos una región en donde el acoplamiento no llegaba a -20 dB, pero lo consideramos aceptable con el objetivo de no aumentar más la dimensión propuesta, esto se muestra en la figura 4.15. En lo que respecta a las zonas de acoplamiento en las bandas de diseño, en la zona de 1.8 GHz se puede apreciar que el acoplamiento se encontraba por debajo de -20 dB, lo cual es un resultado que considerábamos más que aceptable. En el caso de la banda de 2.45 GHz, el acoplamiento se encontraba en la mayoría de la banda por debajo de -13 dB, por lo que se consideró válido. Este acoplamiento resultó especialmente complicado debido a que la región UWB comenzaba especialemnte próxima a la banda de 2.4 GHz en la estructura planteada, el mayor valor que alcanzó fue -12.2 dB por lo que al ser una diferencia de menos de 1 dB se consideró válido.

En lo que respecta a los anchos de banda obtenidos en el total del diseño, en la banda nominal de 1.8 GHz, obtuvimos una adaptación desde 1.7 GHz hasta 1.9 GHz, suponiendo así una mejora con respecto a la anterior etapa de diseño. En la banda de 2.45 GHz obtuvimos una adaptación desde 2.29 GHz hasta 2.7 GHz, suponiendo también una mejora en la adaptación del diseño de la anterior etapa. Además, cabe destacar que se obtuvo una cobertura UWB que comienza en 2.85 GHz hasta 20GHz. La banda de 1.8 GHz obtuvo un ancho de banda relativo de un 11.1 % y la banda de 2.45 GHz obtuvo un ancho de banda relativo del 16.73 %.

Cabe destacar que no se han mostrado los parámetros de adaptación en el segundo puerto ya que la antena es absolutamente simétrica y constituye el mismo gráfico que la adaptación en el puerto número uno. El mismo caso ocurre con los parámetros de transmisión del puerto dos procedente del puerto número uno.

En lo que respecta a los diagramas de radiación, a bajas frecuencias se puede visualizar en las figuras 4.17, 4.18, 4.19 se sigue manteniendo en gran medida la simetría física reflejada en el plano E. Debido a la incorporación de elementos al array en horizontal, se ve reflejado esa asimetría en los diagramas de plano H, lo cual se refleja en los diagramas asociados a dicha representación.

Además, similarmente al caso de la estructura de un elemento, en la región de UWB, los planos son asimétricos a alta frecuencia, ello se refleja en las figuras 4.20, 4.21 y 4.22. Los cortes de planos de radiación tridimensionales se pueden visualizar en el anexo B en las figuras B.4, B.5 y B.6. La impedancia de antena vista a la frecuencia 1.8 GHz fue 50.5 Ohmios, a 2.45 GHz 55 Ohmios, a 4 GHz 58.3 Ohmios, a 7 GHz 41 ohmios, a 10 GHz 46 Ohmios y a 15 GHz 43 Ohmios.

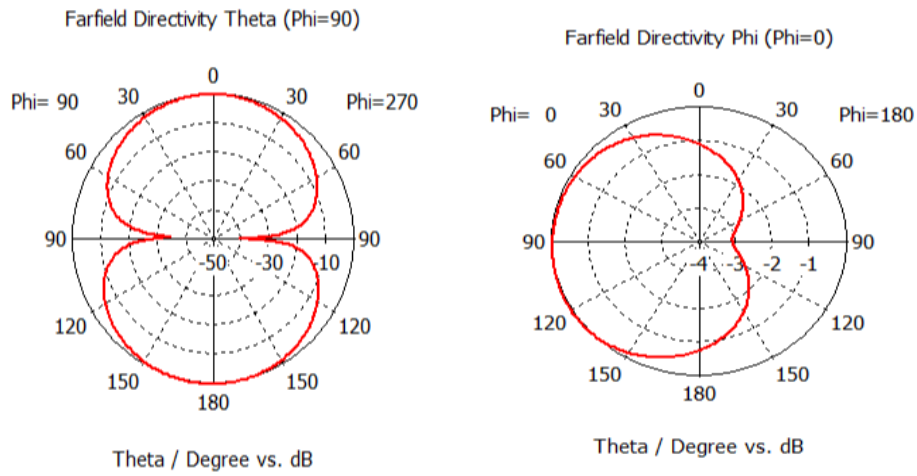


Figura 4.17: Diagramas de radiación a 1.8GHz para el plano E y plano H respectivamente

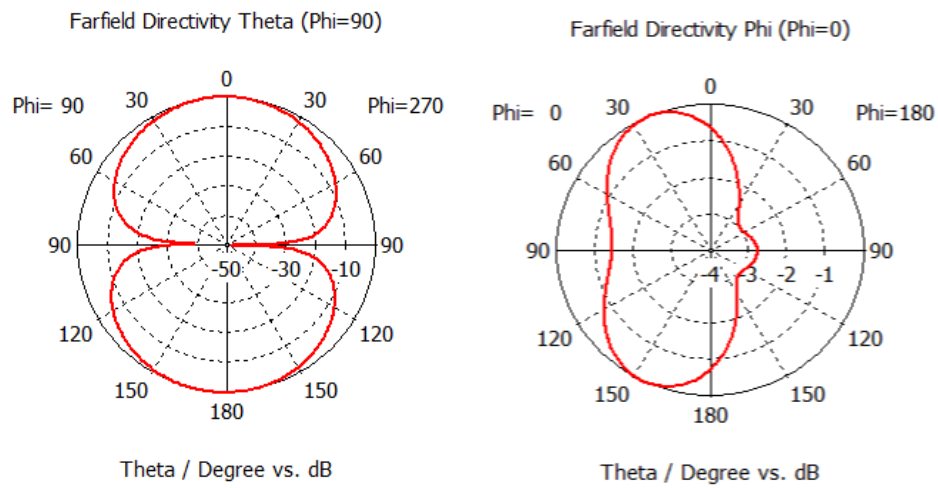


Figura 4.18: Diagramas de radiación a 2.45GHz para el plano E y plano H respectivamente

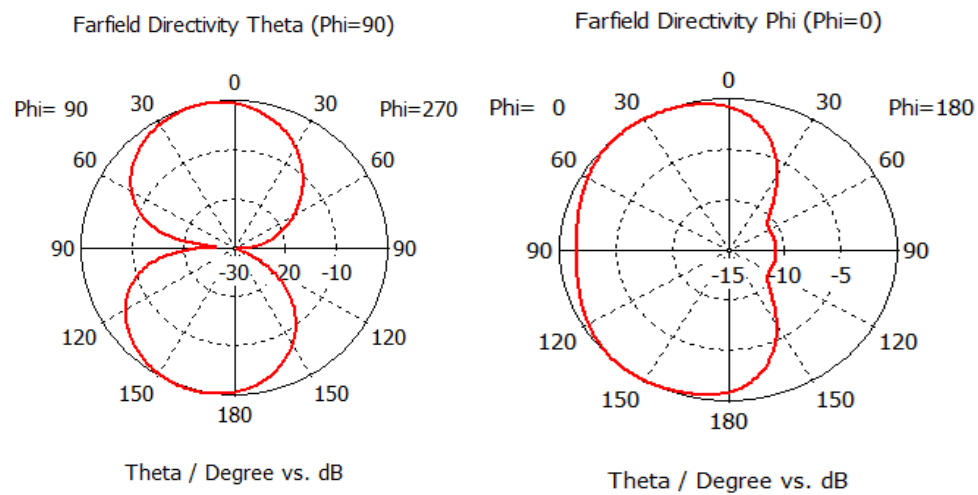


Figura 4.19: Diagramas de radiación a 4GHz para el plano E y plano H respectivamente

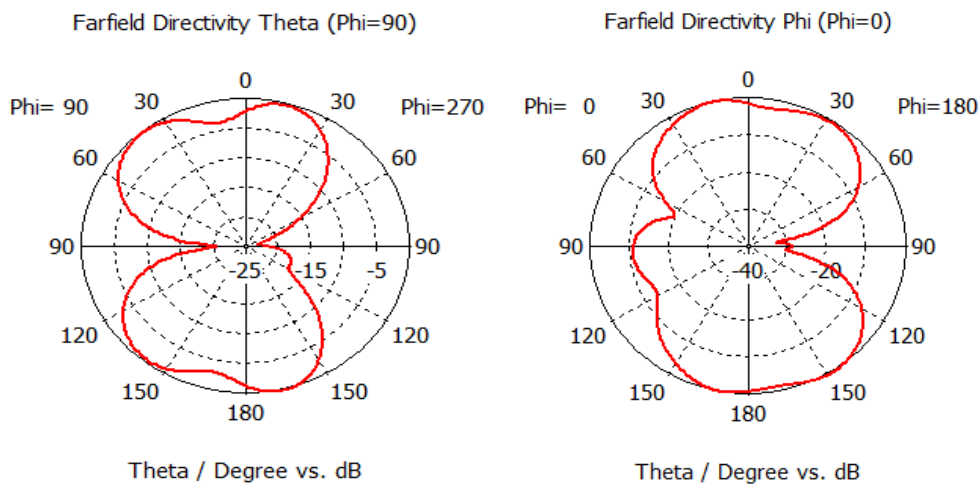


Figura 4.20: Diagramas de radiación a 7GHz para el plano E y plano H respectivamente

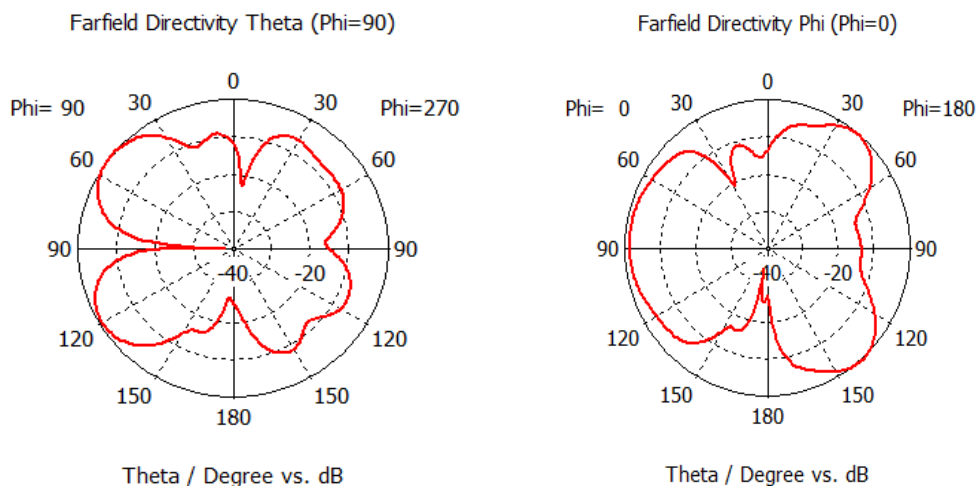


Figura 4.21: Diagramas de radiación a 10GHz para el plano E y plano H respectivamente

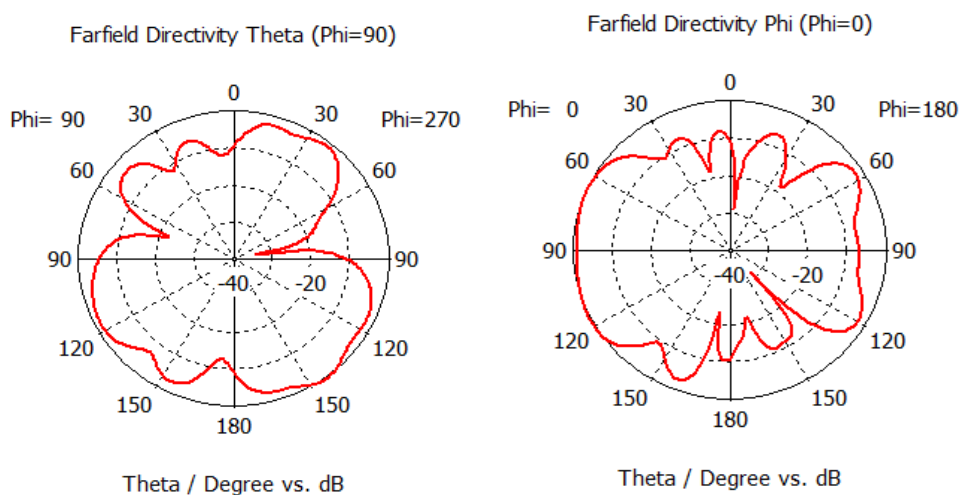


Figura 4.22: Diagramas de radiación a 15GHz para el plano E y plano H respectivamente

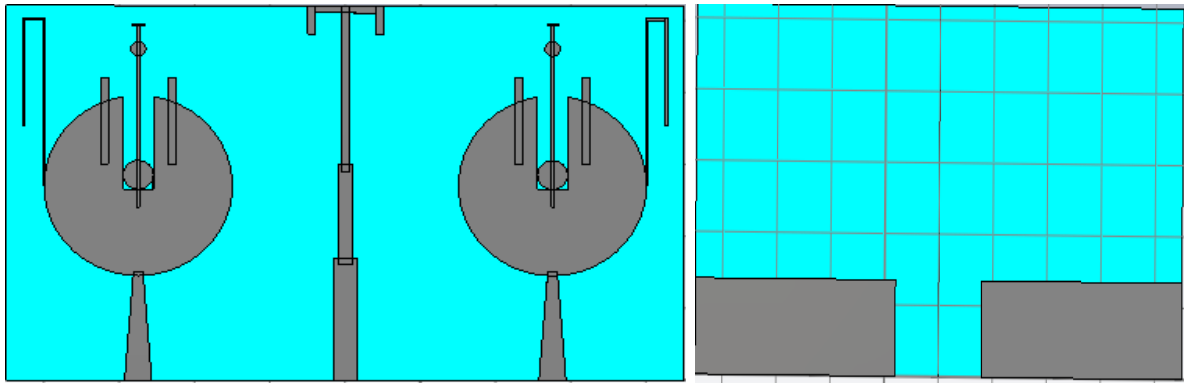


Figura 4.23: Primera etapa de diseño de antena de dos elementos

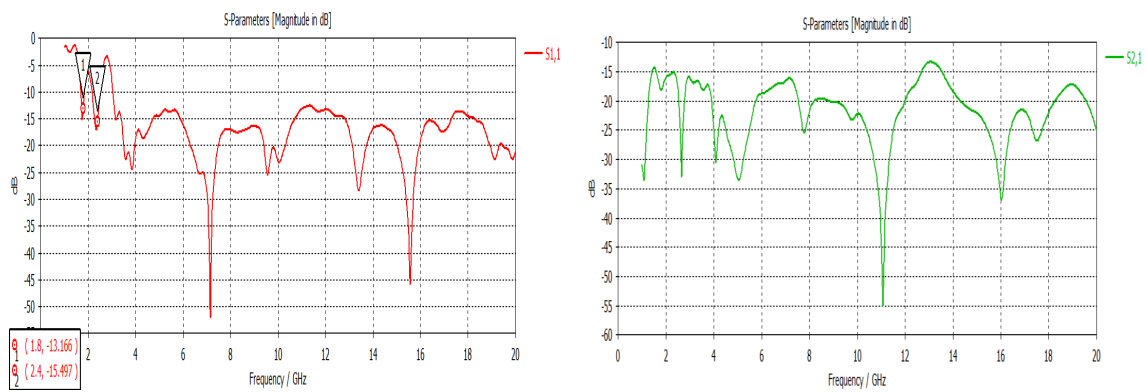


Figura 4.24: Resultados primera etapa de diseño de antena de dos elementos

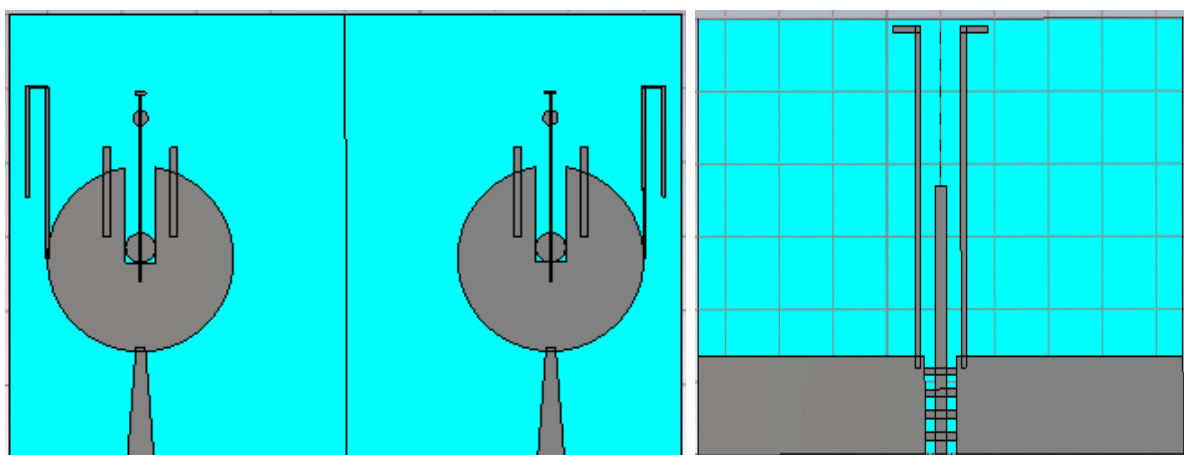


Figura 4.25: Segunda etapa de diseño de antena de dos elementos

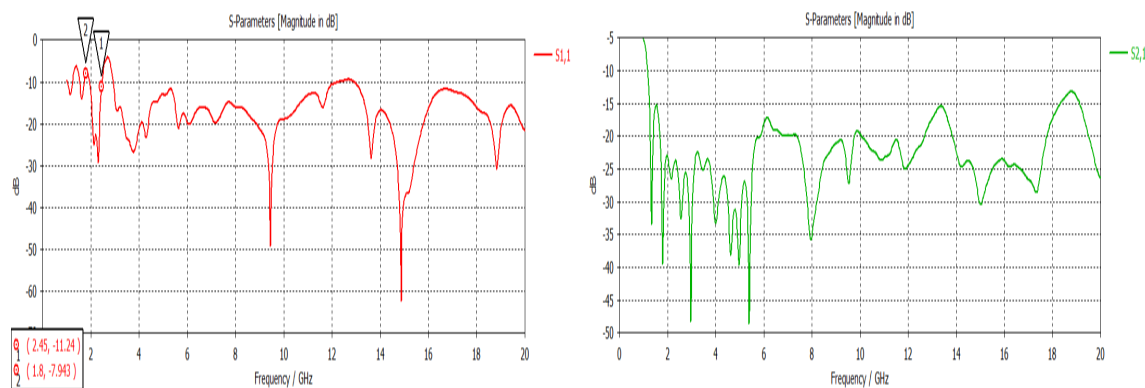


Figura 4.26: Resultados segunda etapa de diseño de antena de dos elementos

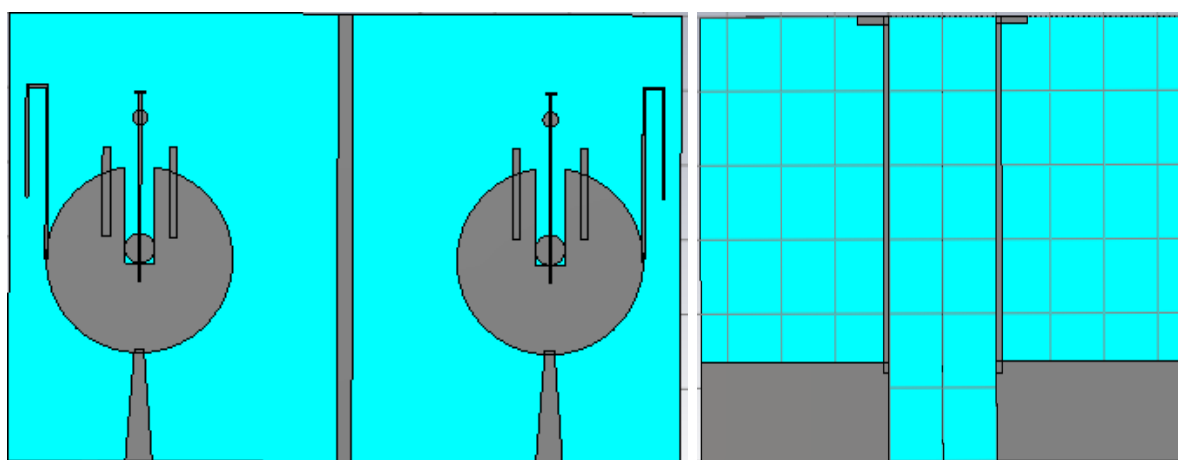


Figura 4.27: Tercera etapa de diseño de antena de dos elementos

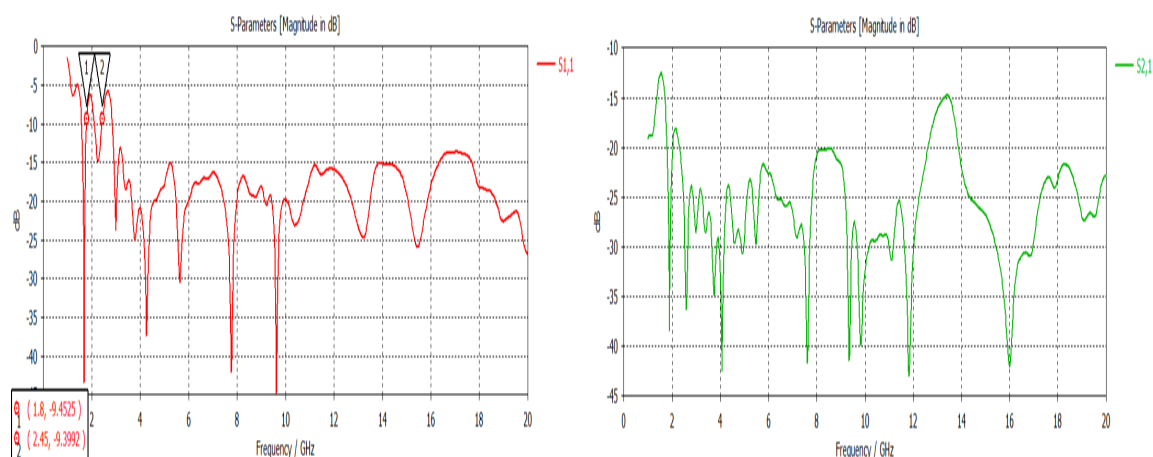


Figura 4.28: Resultados tercera etapa de diseño de antena de dos elementos

4.4. Diseño de antena MIMO de cuatro elementos

En la última y la más importante fase del diseño, se tuvieron que realizar cambios sobre el diseño planteado debido a las dimensiones que se buscaban, así como modificaciones en el elemento unitario para poder cumplir con los requisitos de aislamiento que se plantearon en un inicio. Esto ocurrió debido a los acoplamientos producidos por cada elemento radiante sobre los otros tres que constituyen la totalidad del diseño. Se ha de subrayar el hecho de que los puertos se encuentran definidos en el sentido ascendente de las agujas del reloj. También se ha de mencionar que debido a que se conserva la simetría física, el parámetro S_{nn} es equivalente e igual en resultado a otro parámetro S_{mm} . Lo mismo ocurre con los parámetros S_{nm} y el parámetro S_{mn} . Por ello, solo se mostrarán las transmisiones al puerto 1 dado que se habrán mostrado el resto de parámetros con los cuatro asociados al puerto número 1.

De nuevo en esta fase del diseño solo se detallarán los nuevos elementos añadidos al sistema, y si se hubiera modificado alguna parte del diseño anterior. En caso de que no se modifique una dimensión, no se detallará con el fin de obtener una mayor claridad. Se detallarán también los desarrollos intermedios en el presente capítulo.

En el diseño, se tuvo que modificar la dimensión de las bandas con el objetivo de disminuir el acoplamiento con las barreras horizontales. Además se implementaron barreras sólidas en el plano de los elementos unitarios, así como en el plano destinado a los planos de masa. También cabe destacar que el aislamiento producido por los puertos uno y cuatro en nuestro diseño es debido al diseño realizado de la barrera horizontal mostrado en la figura 4.46. A pesar de que se podría haber realizado con otro tipo de barreras [29], este diseño se realizó íntegramente en su proceso de pruebas hasta conseguir los resultados deseados.

En un inicio, con un planteamiento de una barrera horizontal con el objetivo de mejorar el aislamiento con los puertos 3 y 4, se obtuvo el diseño mostrado en la figura 4.41 con los resultados mostrados en las figuras 4.42 y 4.43. En ellos se puede visualizar que no se consiguió el aislamiento deseado con respecto a los puertos incorporados en sentido vertical. Ello se debió a una anchura demasiado fina de la barrera horizontal planteada. Debido a los resultados obtenidos, se implementaron barreras más amplias como se detalla en 4.44, pero ello conllevó un desplazamiento en frecuencia de las bandas nominales como se detalla en la figura 4.45. A partir de entonces se tuvo que modificar las bandas con el objetivo de recuperar las bandas nominales.

La dimensión resultante que obtuvimos a la hora de cumplir todas las especificaciones planteadas fue de 140 x 94 mm de estructura microstrip total. Dicha dimensión se encontraba dentro de los límites del diseño de la antena dado que se trataría de una antena destinada para uso de teléfonos móviles, y actualmente se pueden encontrar teléfonos próximos a ese tamaño en el mercado.

En cuanto a los anchos de banda obtenidos para las bandas de adaptación, se obtuvo una banda adaptada de 1.62 GHz hasta 1.97 GHz. La banda nominal de 2.45 GHz abarcaba desde 2.34 GHz hasta 2.77 GHz, y todo se muestra en la figura 4.31. Por otro lado, la cobertura UWB abarcaba desde 3.2 GHz hasta 20 GHz. La banda de 1.8 GHz obtuvo un ancho de banda relativo del 19.4 % y la banda de 2.45GHz del 17.55 %. En lo que respecta a transmisiones entre puertos, se puede observar en las figuras 4.32 ,4.33 y 4.34 que en la zona de cobertura UWB, en todo momento las transmisiones de los puertos dos, tres y cuatro hacia el puerto uno se encuentran por debajo de -20 dB, lo cual implicaría haber alcanzado uno de los principales objetivos del presente trabajo. Además, en las zonas de cobertura de las bandas nominales, se obtuvieron siempre transmisiones por debajo de -15 dB, lo cual consideramos un resultado más que válido y notable.

A la hora de examinar los diagramas de radiación, los resultados obtenidos entraban dentro de la norma de los diagramas de radiación de antenas de parche y antenas UWB[2] mostrados en las figuras 4.37, 4.38 ,4.39 y 4.40. Esta variación en los diagramas de radiación en la zona UWB se debe a que se trata de una resonancia de un ancho de banda muy extenso, en donde la resonancia no se mantiene constante, pero siempre por debajo de los -10dB de objetivo.

En los casos de las bandas definidas representadas en las figuras 4.35 y 4.36, los diagramas obtenidos en plano E siguen siendo muy similares a los diseños de 2 elementos, ello es debido a que el sentido de simetría física de plano E no se habría visto modificado. Por otro lado, al incorporar elementos al array en sentido vertical, el plano H verá modificada su simetría física, y los diagramas de plano H sufren cambios en términos de simetría de diagrama de radiación.

Por otra parte, cabe destacar que en los diagramas detallados en tres dimensiones del anexo B, mostrados en las figuras B.7, B.8 y B.9, se puede apreciar la forma de radiación lobular en las frecuencias menores, y en las frecuencias mayores se acentúa más la asimetría en el diagrama 3D. En términos de la impedancia de antena vista en cada frecuencia, a 1.8 GHz se obtuvo una impedancia de 58.7 Ohmios, a 2.45 GHz se obtuvo una impedancia de 52.7 OHmios, a 4 GHz 39 Ohmios, a 7 GHz 42.3 Ohmios, a 10 GHz se vio una impedancia de 41.7 Ohmios y a 15 GHz una impedancia de 49.5 Ohmios.

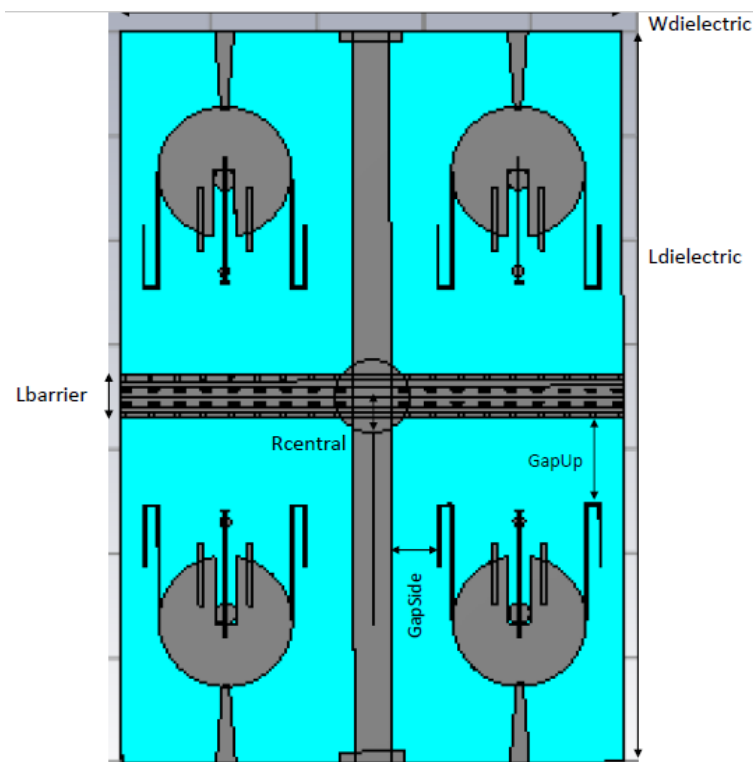


Figura 4.29: Esquema primera cara diseño de 4 elementos

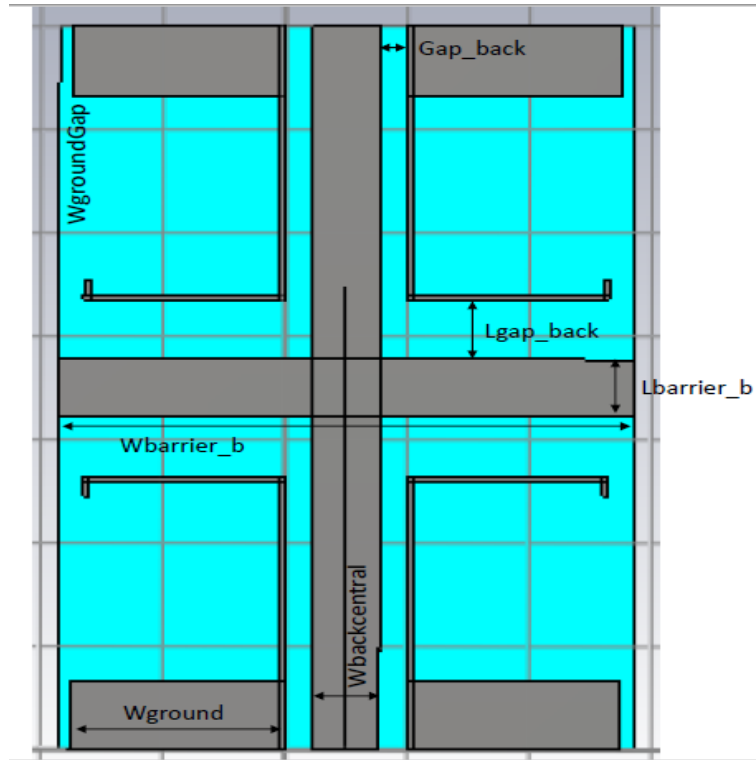


Figura 4.30: Esquema segunda cara diseño de cuatro elementos

Dimensiones cara 1	
Variable	Tamaño en mm
Lbarrier	8
Rcentral	7
GapUp	16.7
GapSide	8.85
Ldielectric	140
Wdielectric	94
L1	22.3
L2	2.8
L3	12
Alturacentral	17.8
EspacioCentral	24
AnchuraBarrera	7
EspacioBarrera	11.35
EspacioBarrera2	8.85

Cuadro 4.6: Dimensiones en la cara superior de diseño de 4 elementos

Dimensiones cara 2	
Variable	Tamaño en mm
WgroundGap	2
Gap_back	55
Lgap_back	11.5
Lbarrier_b	11
Wbarrier_b	94
Wbackcentral	11
Wground	35
Gap_back	4.5

Cuadro 4.7: Dimensiones en la cara inferior de diseño de cuatro elementos

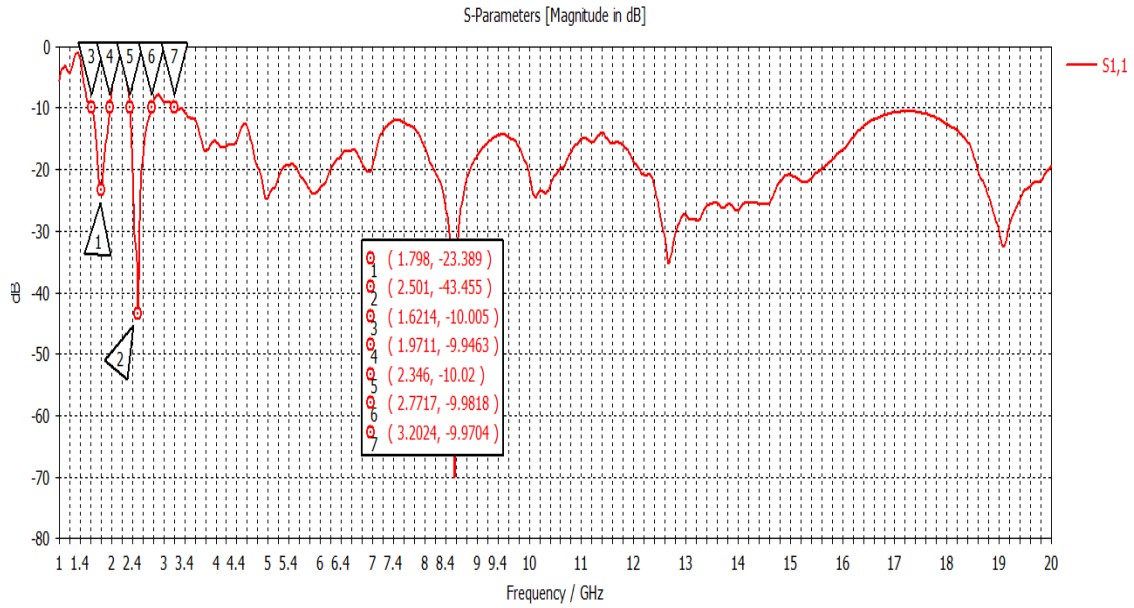


Figura 4.31: Adaptación al puerto 1 del diseño de cuatro elementos

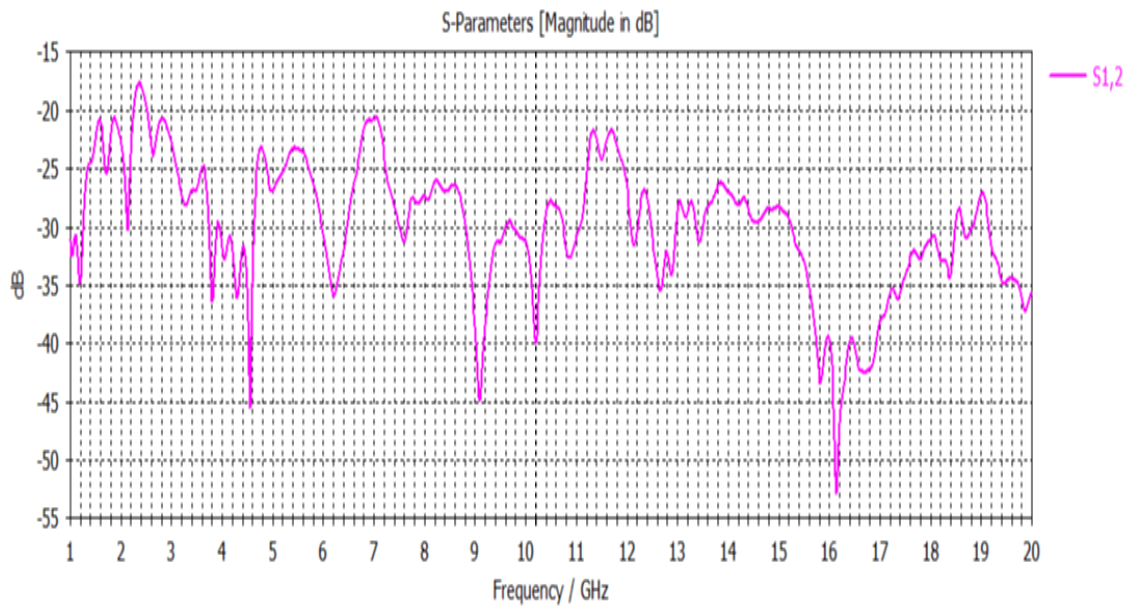


Figura 4.32: Transmisión al puerto 1 del puerto 2 para diseño de cuatro elementos

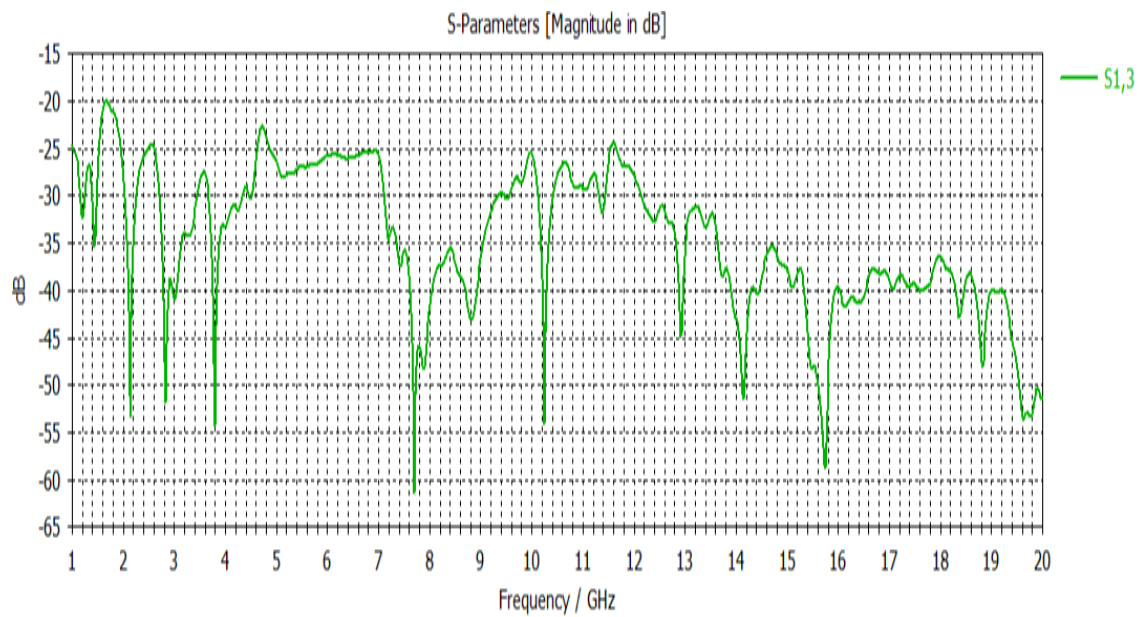


Figura 4.33: Transmisión al puerto 1 del puerto 3 para diseño de cuatro elementos

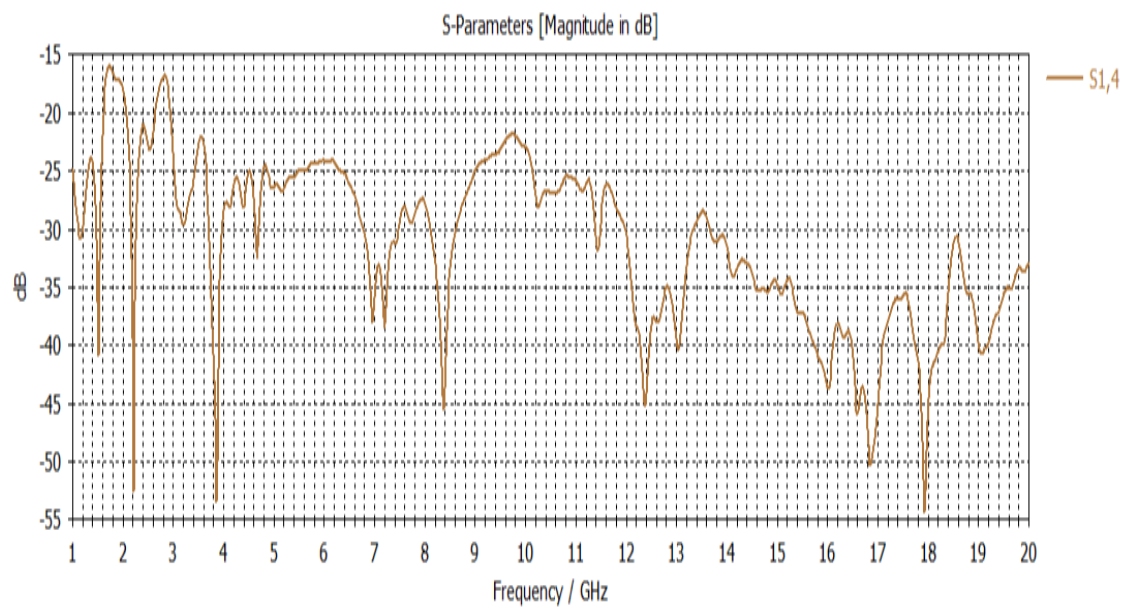


Figura 4.34: Transmisión al puerto 1 del puerto 4 para diseño de cuatro elementos

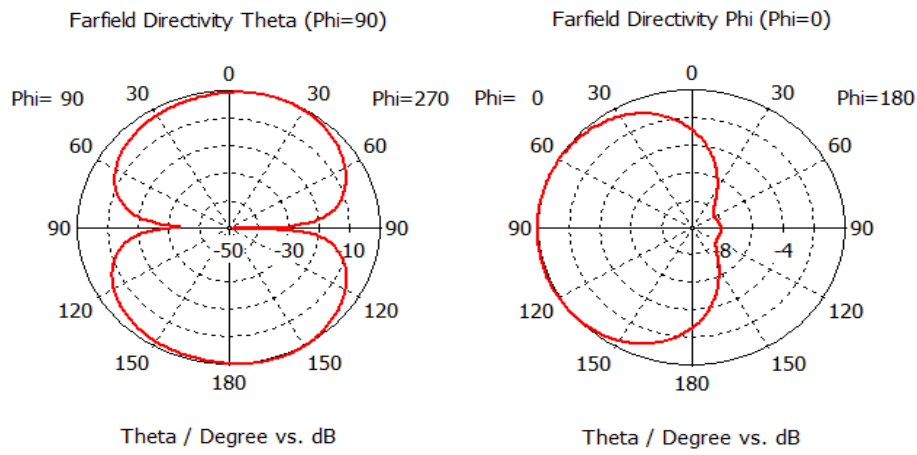


Figura 4.35: Diagramas de radiación a 1.8GHz para el plano E y plano H respectivamente

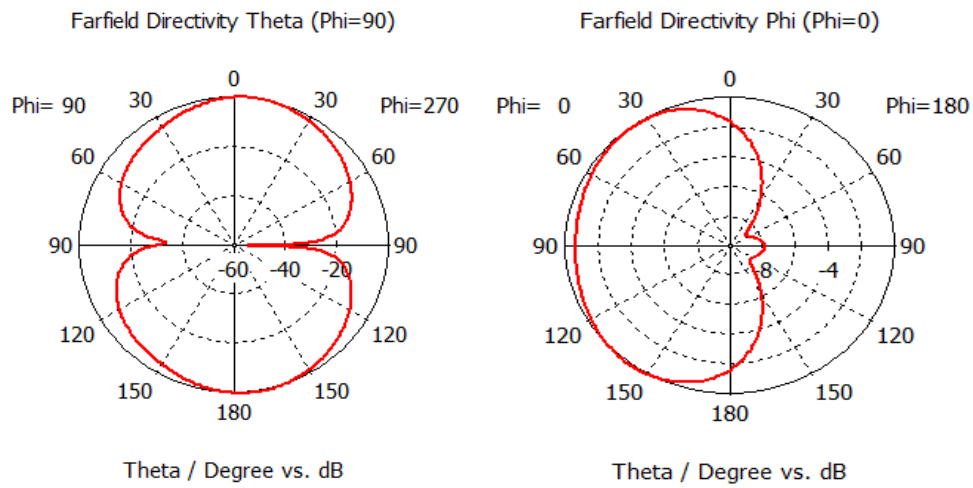


Figura 4.36: Diagramas de radiación a 2.45GHz para el plano E y plano H respectivamente

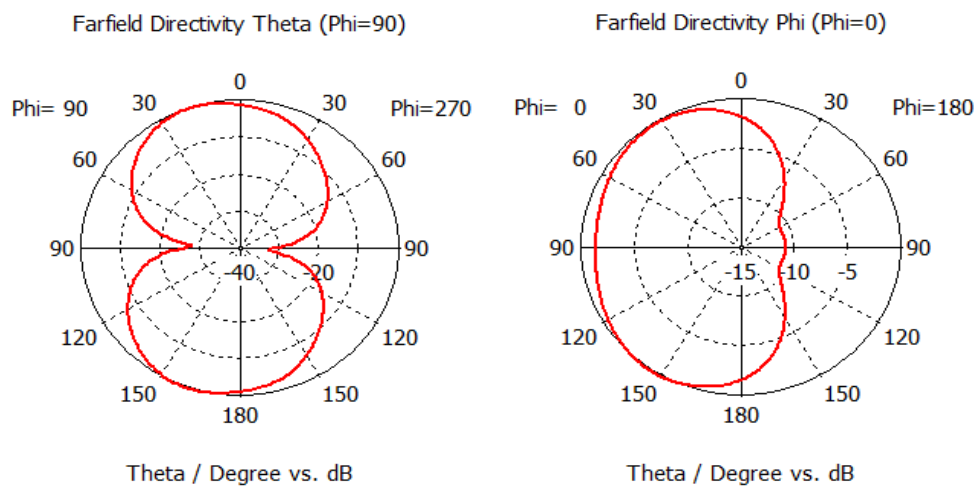


Figura 4.37: Diagramas de radiación a 4GHz para el plano E y plano H respectivamente

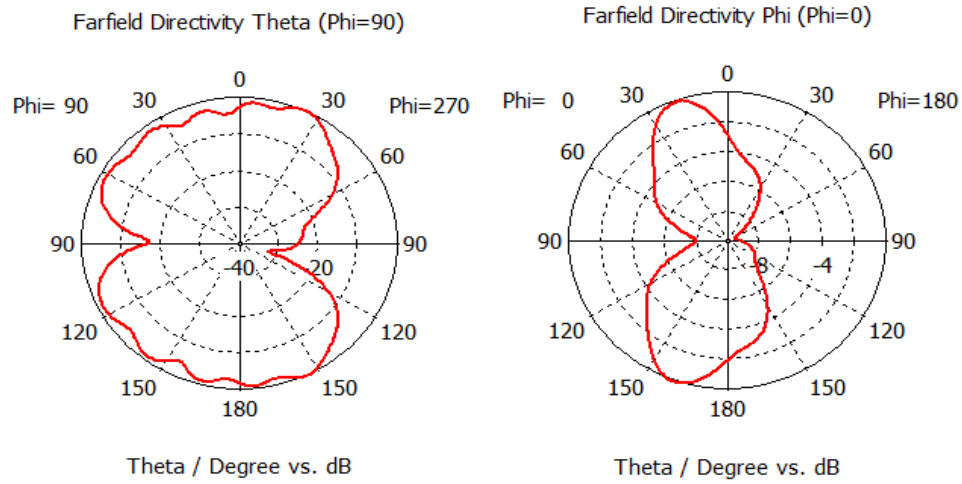


Figura 4.38: Diagramas de radiación a 7GHz para el plano E y plano H respectivamente

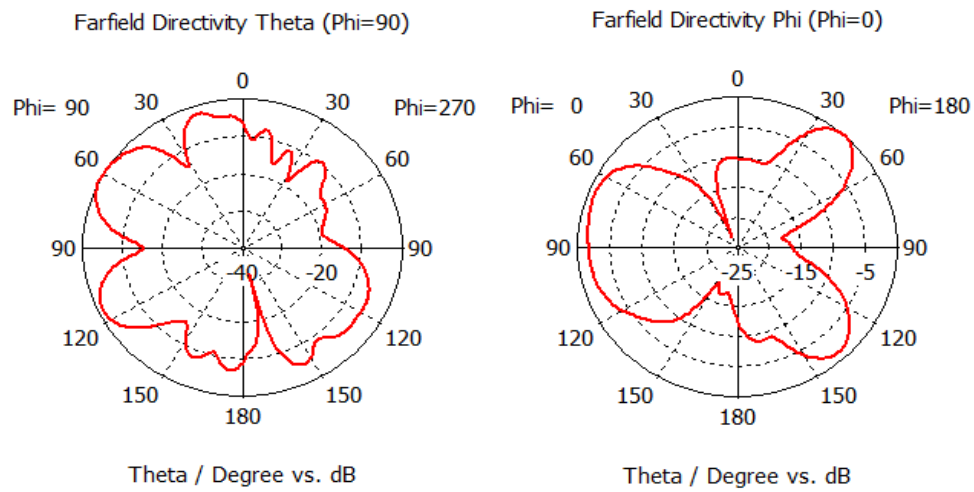


Figura 4.39: Diagramas de radiación a 10GHz para el plano E y plano H respectivamente

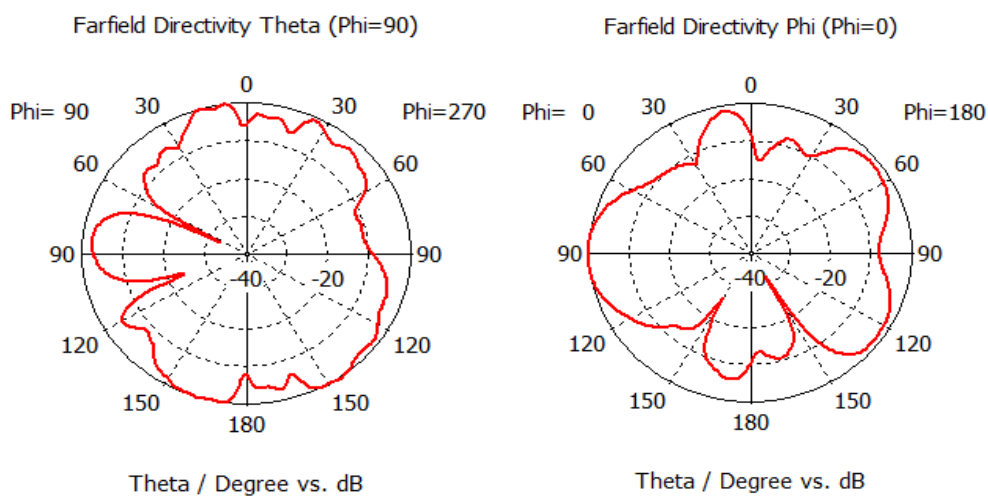


Figura 4.40: Diagramas de radiación a 15GHz para el plano E y plano H respectivamente

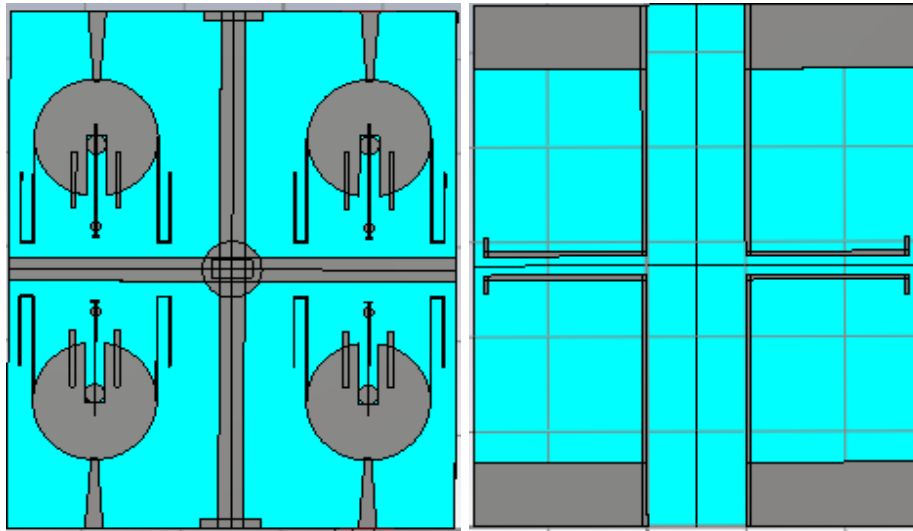


Figura 4.41: Primera etapa de diseño de antena de cuatro elementos

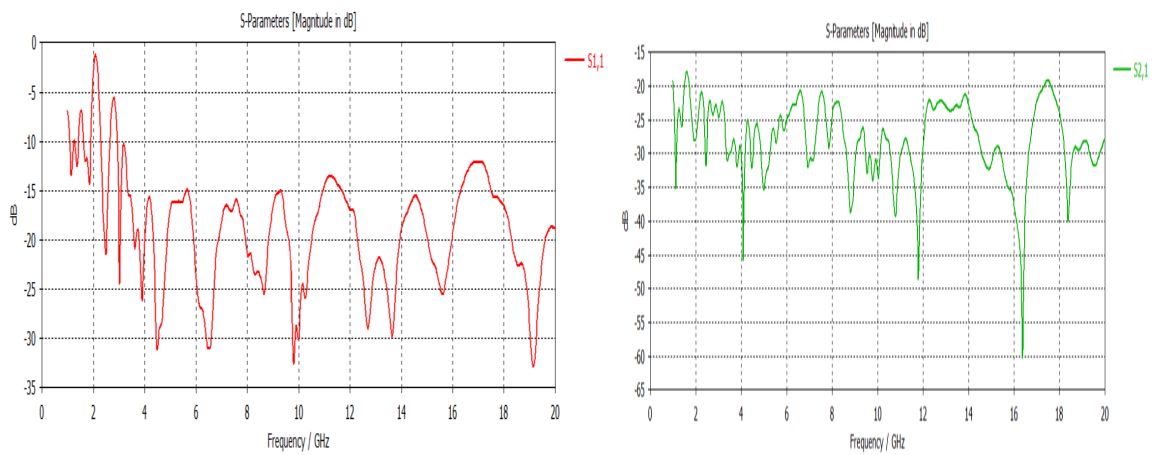


Figura 4.42: Resultados tercera etapa de diseño de antena de cuatro elementos de puertos 1 y 2

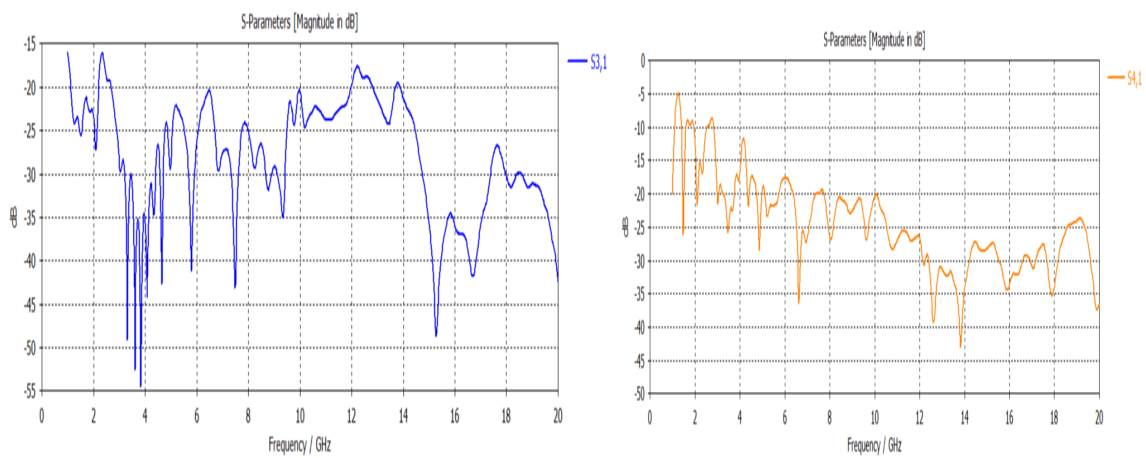


Figura 4.43: Resultados primera etapa de diseño de antena de cuatro elementos de puertos 3 y 4

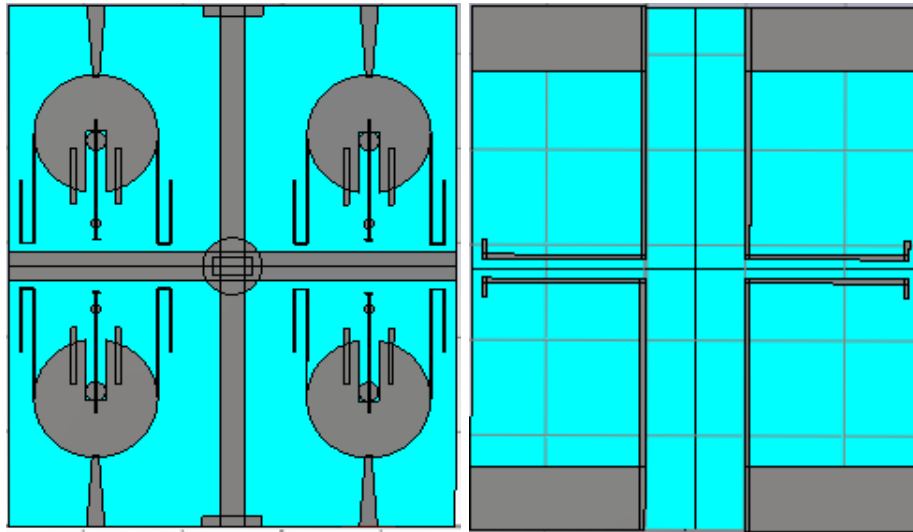


Figura 4.44: Segunda etapa de diseño de antena de cuatro elementos

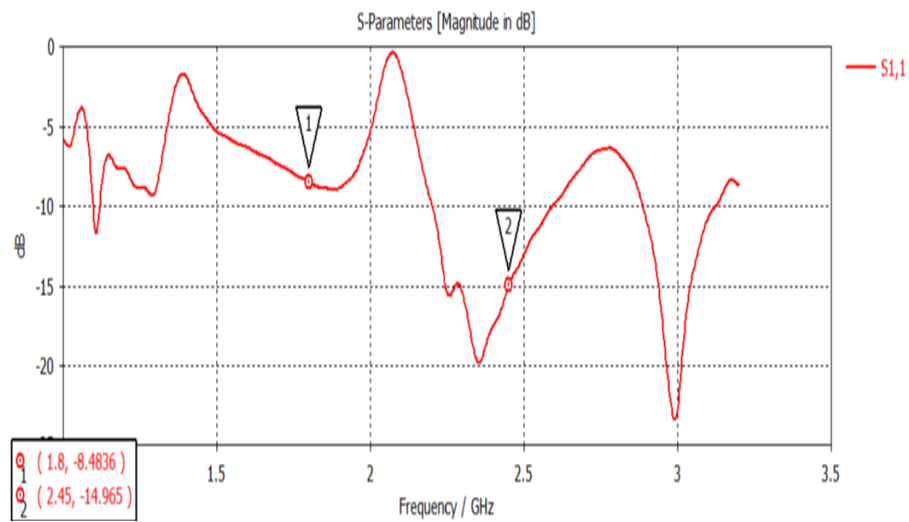


Figura 4.45: Resultados segunda etapa de diseño de cuatro elementos

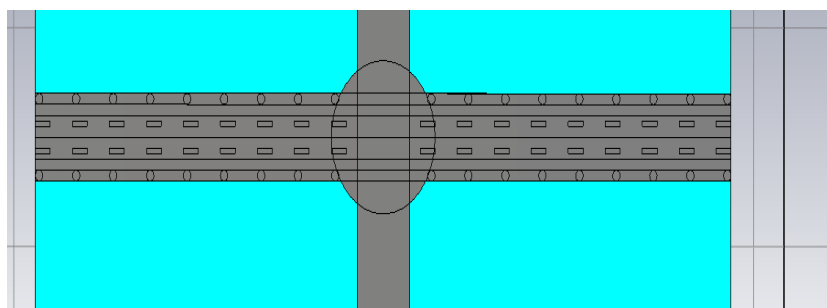


Figura 4.46: Detalle barrera horizontal cara superior

5

Conclusiones y trabajo futuro

En el presente TFG se han llevado a cabo de manera satisfactoria los tres diseños planteados en un inicio. Se han realizado el diseño de un elemento con las bandas de diseño así como la cobertura UWB hasta 20 GHz, el diseño de dos elementos con barreras sólidas y las especificaciones de acoplamiento, y el diseño de cuatro elementos mejorando prestaciones e implementando barreras en ambas caras del diseño.

A modo de conclusión, podemos decir que el trabajo propuesto era posible y se ha diseñado, y que los diseños se habían realizado con el objetivo de ser construidos.

Como posibles trabajos futuros, el presente trabajo se pretende reducir en tamaño hasta unas dimensiones de 60 x 55 mm aproximadamente, integrando los cuatro elementos y conservando la cobertura UWB. También se podría proseguir con el diseño a frecuencias aún más altas, además de construir el presente diseño en los laboratorios de la EPS.

Glosario de acrónimos

- **UWB:** *Ultra Wide-Band*
- **ROE:** *Razón de onda estacionaria*
- **ISM:** *Industrial Scientific and Medical (Band)*
- **TCP:** *Transmission Control Protocol*
- **UDP:** *User Datagram Protocol*
- **TDMA:** *Time Division Multiple Access*
- **LTE:** *Long Term Evolution*
- **GSM:** *Global System for Mobile communications*
- **MIMO:** *Multiple input- Multiple output*
- **TEM:** *Transversal electromagnético*
- **IEEE:** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- **SHF:** *Super High Frecuency*
- **EHF:** *Extremely High Frecuency*
- **UMTS:** *Universal Mobile Telecommunications System*

Bibliografía

- [1] Masa Campos José Luis. *Transparencias de la asignatura de Antenas y compatibilidad electromagnética*. UAM, 2020.
- [2] A. A. Ibrahim, M. A. Abdalla, and J. L. Volakis. 4 elements UWB MIMO antenna for wireless applications. In *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pages 1651–1652, 2017.
- [3] Jojoa-Gómez P. Agredo-Méndez, G. and V Almenar-Terré. Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica. *Entramado*, 11:250 – 261, 07 2015.
- [4] D Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley., 2005.
- [5] IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org>. Consultado el 7 de mayo de 2020.
- [6] IEEE. IEEE Draft Standard for Definitions of Terms for Antennas. *P145/DD2, March 2013*, pages 1–38, 2013.
- [7] C. A. Balanis. *Antenna Theory. Analysis and Design*. John Wiley and Sons., 2005.
- [8] Z. Bai, D. Yuan, Y. Zhong, H. Park, and K. Kwak. Code Selected M-ary DS-BPAM UWB Communication System. In *2008 10th International Conference on Advanced Communication Technology*, volume 2, pages 883–886, 2008.
- [9] J Díaz. Tecnología Ultra-Wideband (UWB): la revolución a corto alcance. *IEEE Barcelona Student Branch*, pages 52–56, 2003.
- [10] X. Zhao and J. Choi. Multiband MIMO antenna for 4G mobile terminal. In *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pages 49–51, 2013.
- [11] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(9):116–126, 1997.
- [12] Nur Mahalin, Sharifah Hafizah Syed Ariffin, and Rozeha A Rashid. 2.4GHZ ISM band congestion : WLAN and WPAN performance analysis. *South East Asian Technical Universities Consortium(SEATUC) - 3rd SEATUC Symposium*, 02 2009.
- [13] Zia Ur Rahman. GSM Technology: Architecture, Security and Future Challenges. *International Journal of Science Engineering and Advance Technology*,, 5:70–74, 02 2017.
- [14] Rizky Permadi Megantara and Tommi Hariyadi. Directional 2x2 MIMO Microstrip Antenna for LTE 1.8 GHz Application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 384:012049, 07 2018.
- [15] D. F. Monà, E. S. Sakomura, and D. C. Nascimento. Microstrip-to-probe fed microstrip antenna transition. In *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pages 1521–1522, 2018.

- [16] Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra WideBand Transmission Systems. pages 1–118, 2002.
- [17] IEEE. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. *IEEE No 145-1973*, pages 1–18, 1973.
- [18] Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris, and Miguel Ferrando Bataller. *Antenas*. Edicions UPC, 2002.
- [19] J. Guo, J. Fan, L. Sun, and B. Sun. A four-antenna system with high isolation for mobile phones. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12:979–982, 2013.
- [20] N. Kumar, K. K. Singh, and R. K. Badhai. A tapered feed circular monopole super ultra-wideband (UWB) printed antenna. In *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, pages 1943–1946, 2016.
- [21] Robert E. Collin. *Foundations for Microwave Engineering*. JOHN WILEY AND SONS, INC., 2001.
- [22] X. Zhao and J. Choi. Multiband MIMO antenna for 4G mobile terminal. In *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pages 49–51, 2013.
- [23] H. Sun, C. Ding, H. Zhu, and Y. J. Guo. Dual-polarized multi-resonance antennas with broad bandwidths and compact sizes for base station applications. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 1:11–19, 2020.
- [24] V. O. Doroshenko, O. E. Strelnytskyi, and O. O. Strelnytskyi. Experimental study of the properties of wideband antennas of special shape. In *2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, pages 1–3, 2015.
- [25] F. Fereidoony, S. Chamaani, and S. A. Mirtaheri. Systematic Design of UWB Monopole Antennas With Stable Omnidirectional Radiation Pattern. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:752–755, 2012.
- [26] S. B. Harkanche, A. B. Nandgaonkar, and S. V. Khobragade. Tenuous Hexagonal Microstrip Fractal Antenna for UWB Applications. In *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pages 636–639, 2018.
- [27] Z. Chen, X. Dai, and G. Luo. A new H-slot coupled microstrip filter-antenna for modern wireless communication systems. In *2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, pages 1–3, 2018.
- [28] T. K. Roshna, U. Deepak, V. R. Sajitha, K. Vasudevan, and P. Mohanan. A Compact UWB MIMO Antenna With Reflector to Enhance Isolation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(4):1873–1877, 2015.
- [29] H. Li, J. Xiong, and S. He. A Compact Planar MIMO Antenna System of Four Elements With Similar Radiation Characteristics and Isolation Structure. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8:1107–1110, 2009.



Resonancia

En los parámetros básicos de una antena, en términos de cuando es una antena resonante, ello implica que la parte imaginaria de la impedancia de antena se iguale a cero. Quedando así solo parte real en la impedancia vista de la antena. Esto se ve expresado en la ecuación (2.1).

Para comprender el desarrollo por el cual se cancela la parte compleja, siempre se acude al desarrollo de una antena bajo el modelo de línea de transmisión indicado en la imagen A.1. En la resonancia de una antena ocurre que la parte compleja de la impedancia vista de la antena se anula, y la adaptación mejorará en función del coeficiente de reflexión visto. [7]

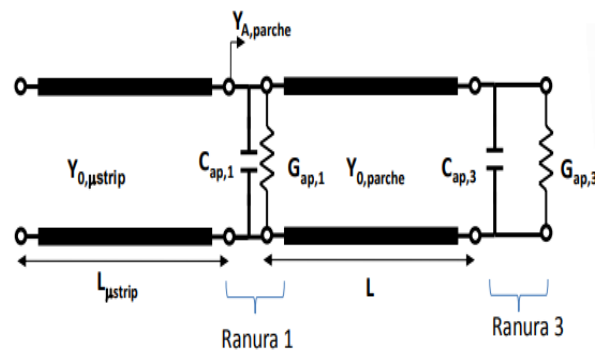


Figura A.1: Modelo de línea de transmisión aplicada a antenas impresas. Recuperada de [1]

B

Diagramas de radiación en tres dimensiones

A continuación se mostrarán los diagramas de radiación de los diseños planteados. Cabe destacar que han sido referenciados a lo largo del documento y que se han representado los planos evaluados en una disposición tridimensional.

Se comenzará por la representación de los diagramas del diseño del elemento unitario, visto en las figuras B.1, B.2 y B.3. En donde se puede apreciar como la disparidad en la simetría va aumentando con la frecuencia.

Se proseguirá con las representaciones del diseño de dos elementos mostrado en las figuras B.4, B.5 y B.6. En donde ocurre un caso similar al anterior.

Por último se representarán los diagramas del diseño MIMO de cuatro elementos en las figuras B.7, B.8 y B.9.

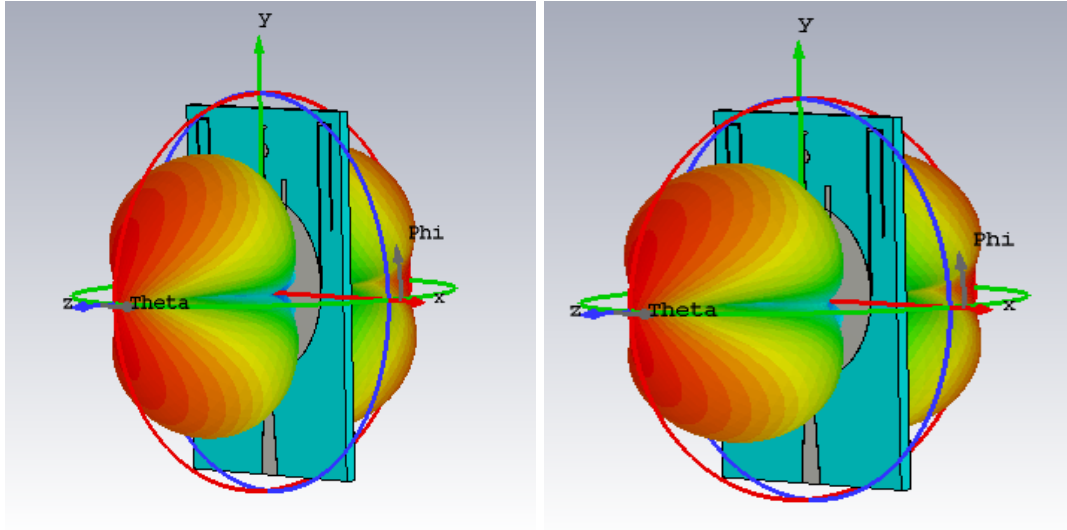


Figura B.1: Diagramas de radiación 3D a 1.8 GHz y 2.45 GHz respectivamente

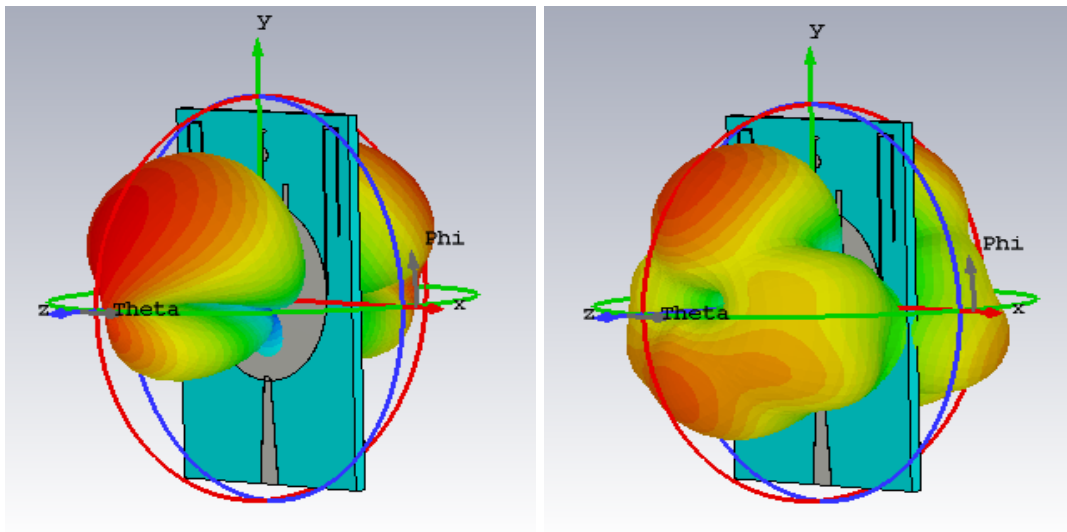


Figura B.2: Diagramas de radiación 3D a 4GHz y 7GHz respectivamente

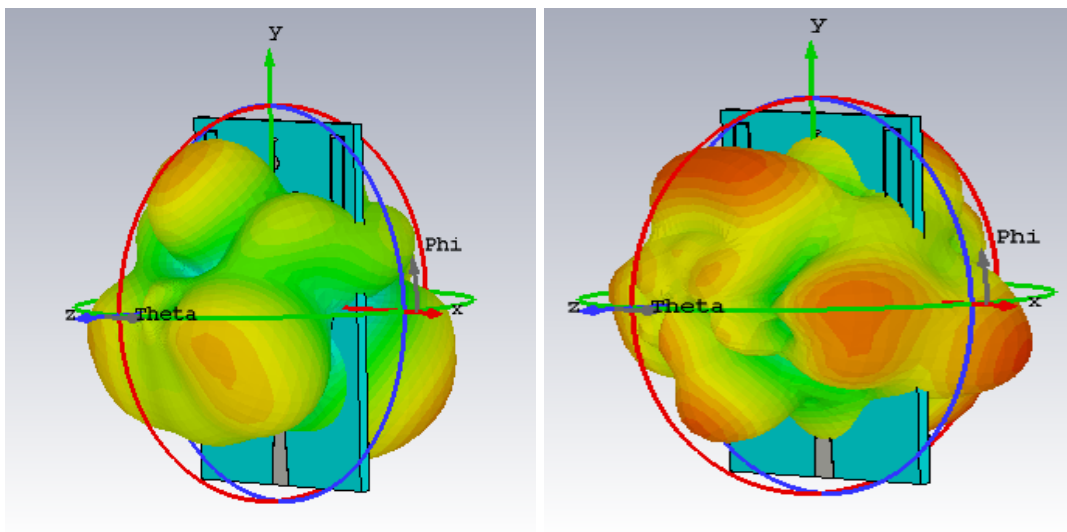


Figura B.3: Diagramas de radiación 3D a 10GHz y 15GHz respectivamente

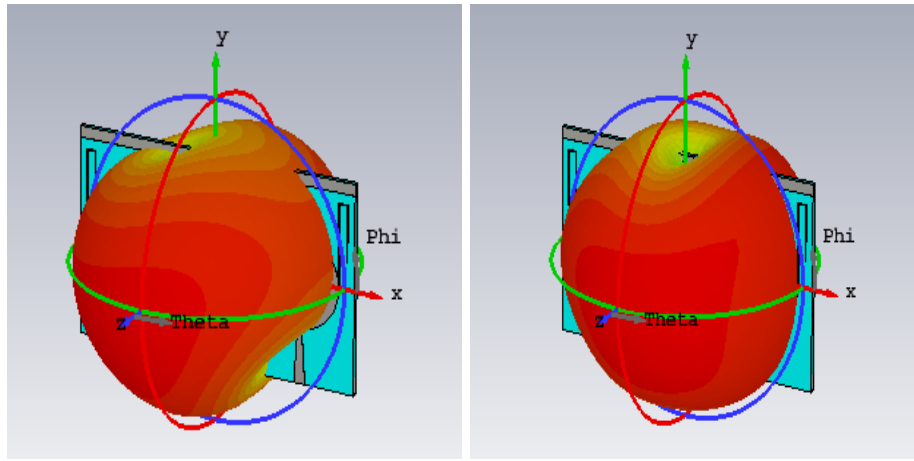


Figura B.4: Diagramas de radiación 3D a 1.8GHz y 2.45GHz respectivamente de diseño de dos elementos

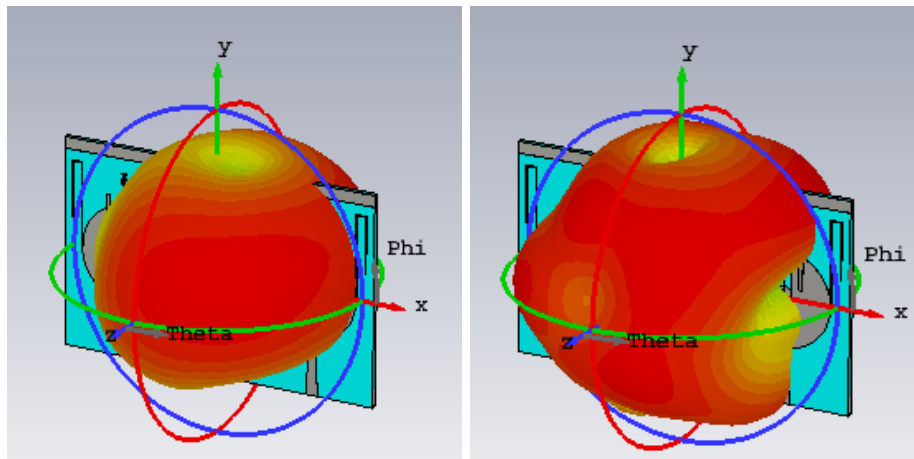


Figura B.5: Diagramas de radiación 3D a 4GHz y 7GHz respectivamente de diseño de dos elementos

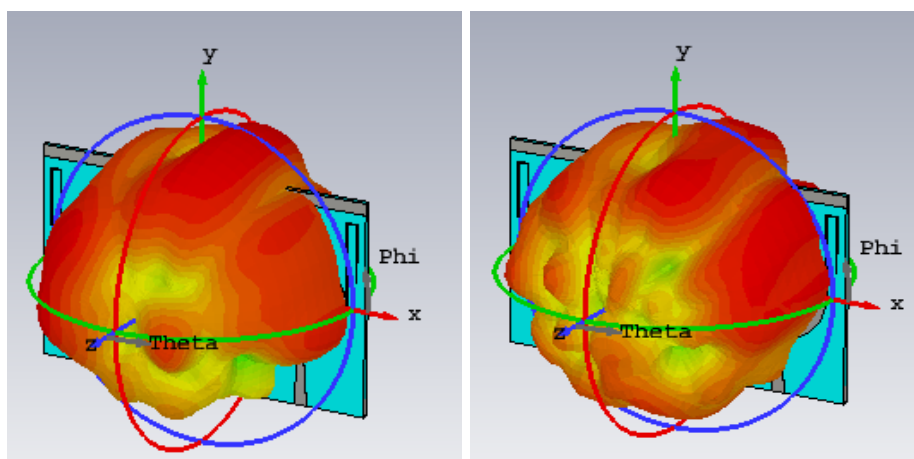


Figura B.6: Diagramas de radiación 3D a 10GHz y 15GHz respectivamente de diseño de dos elementos

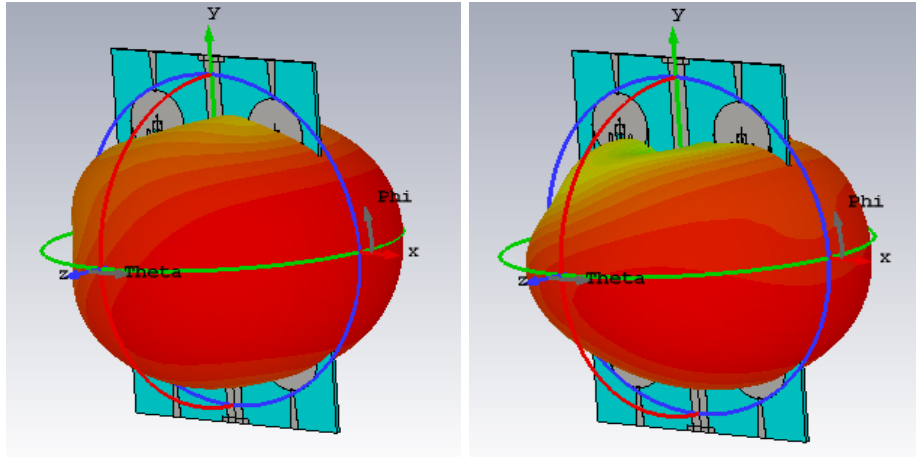


Figura B.7: Diagramas de radiación 3D a 1.8GHz y 2.45GHz respectivamente de diseño de cuatro elementos

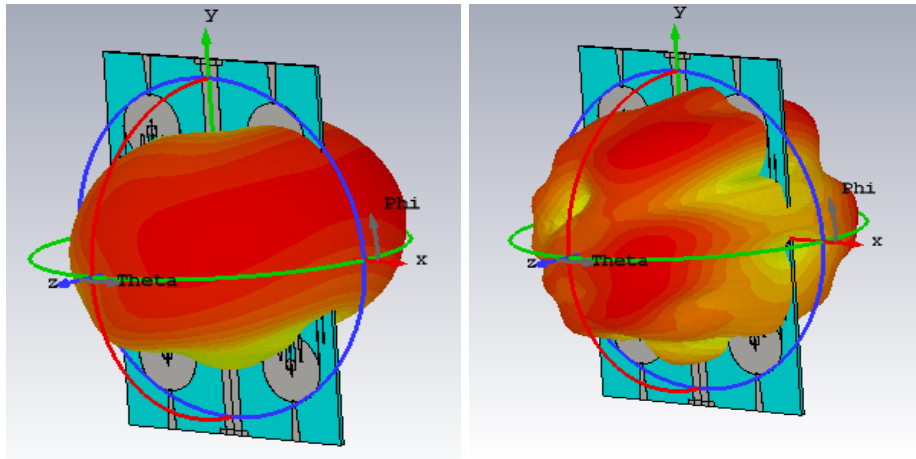


Figura B.8: Diagramas de radiación 3D a 4GHz y 7GHz respectivamente de diseño de cuatro elementos

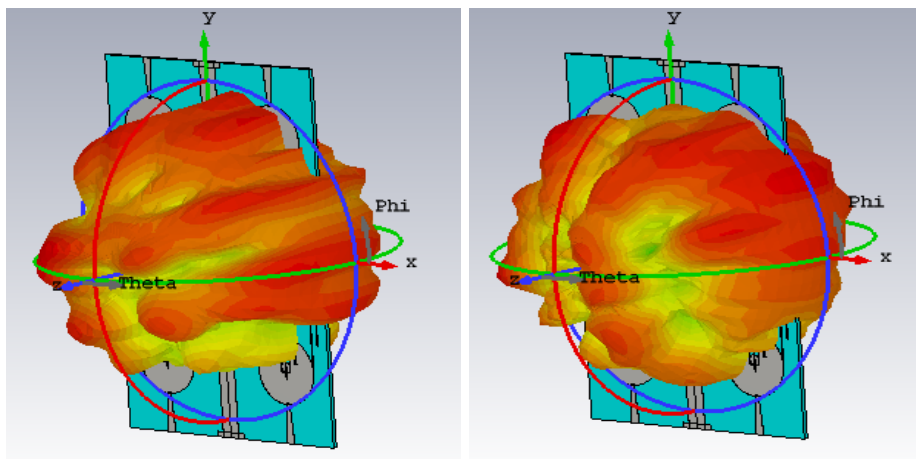


Figura B.9: Diagramas de radiación 3D a 10GHz y 15GHz respectivamente de diseño de cuatro elementos



Detalle de resultados

Resultado de adaptación de antena de un elemento:

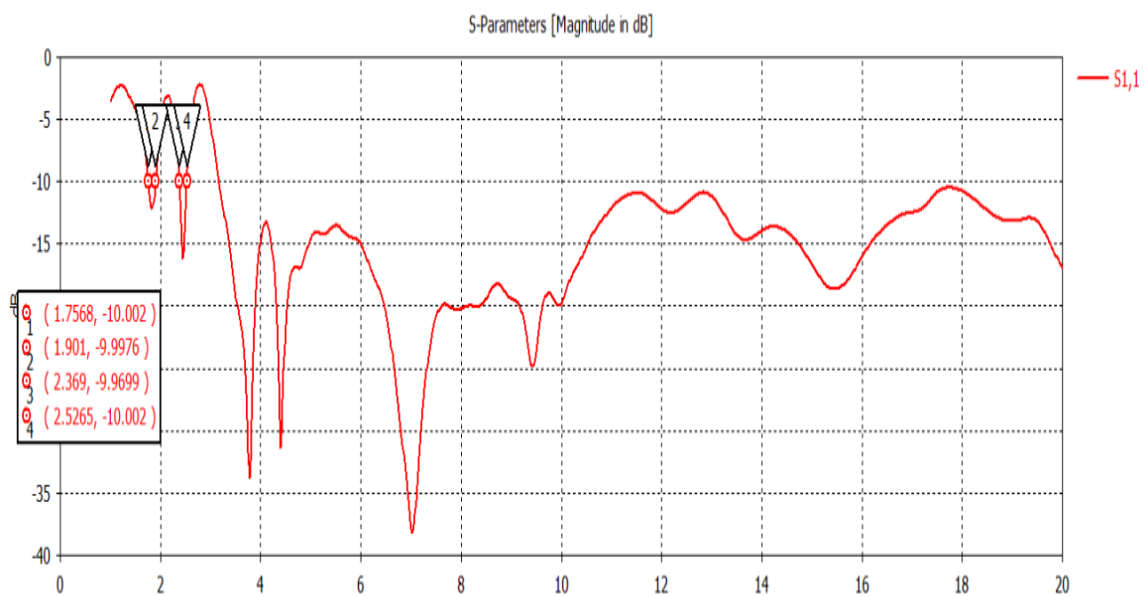


Figura C.1: Detalle de adaptación

Resultado de adaptación de antena de dos elementos así como transmisión:

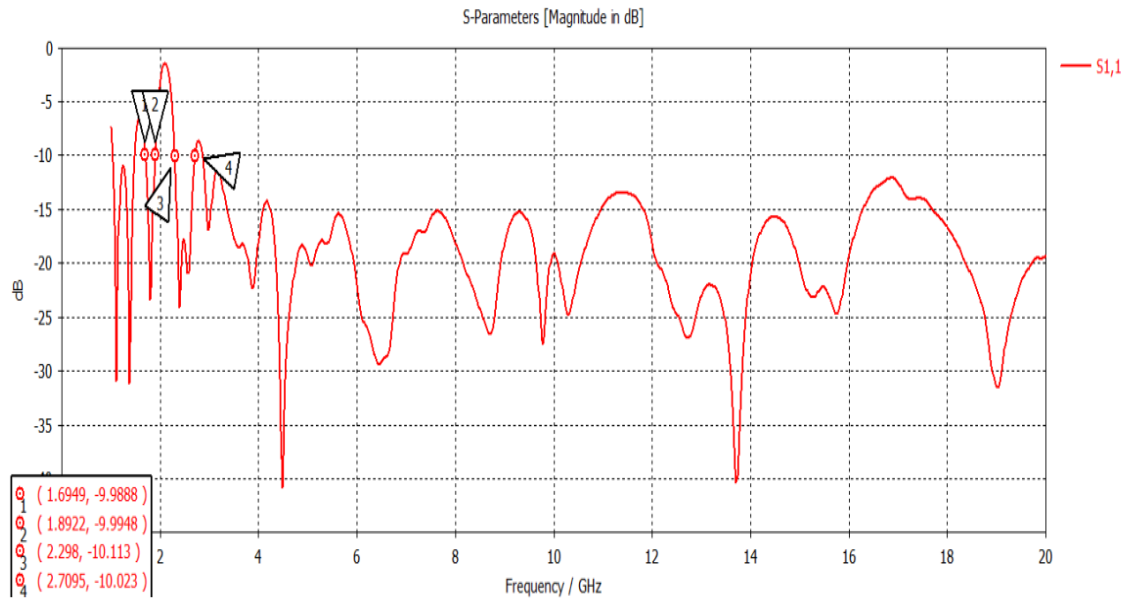


Figura C.2: Detalle de adaptación

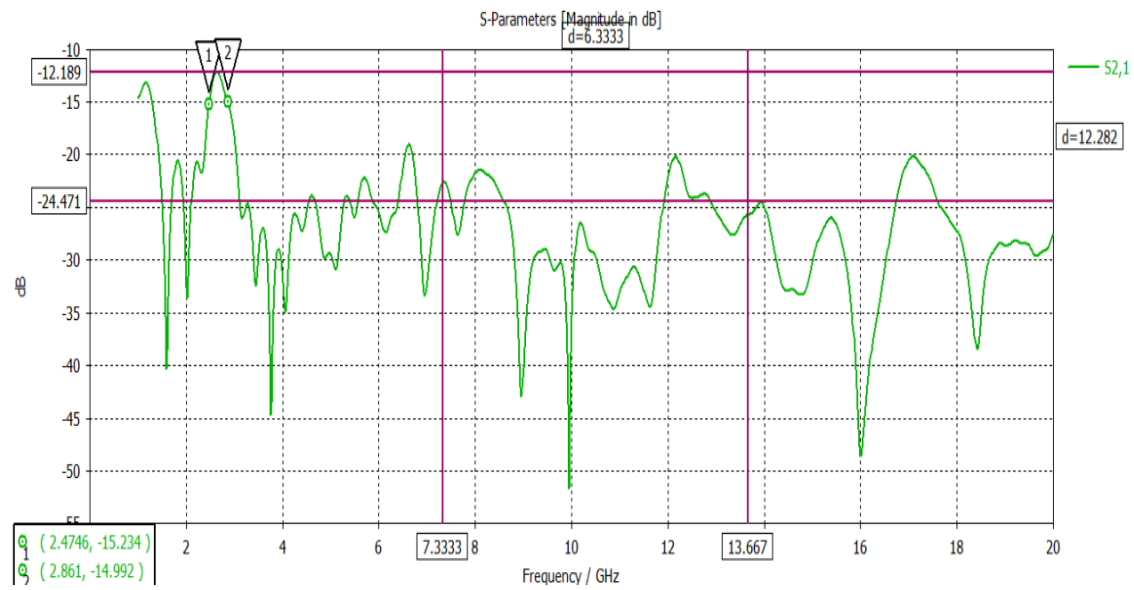


Figura C.3: Detalle de transmisión



Diseños a muy alta frecuencia

Uno de los posibles trabajos futuros podría tratarse del diseño hacia cada vez más alta frecuencia. Dado que los presentes diseños trabajarían hasta 20 GHz, si se prosiguiera subiendo en frecuencia se entraría en las bandas *Super High Frequency* (SHF) así como *Extremely High Frequency* (EHF) que abarcarían hasta 30 GHz y hasta 300 GHz respectivamente.

El presente diseño de cuatro elementos se simuló hasta 50 GHz y se obtuvieron los siguientes resultados mostreados en las figuras D.1, D.2, D.3 y D.4. Como se puede observar, el parámetro de adaptación a partir de 20 GHz no se mantiene en todo momento por debajo de -10 dB, pero en el caso de las transmisiones, todas cumplen requisitos en todo momento.

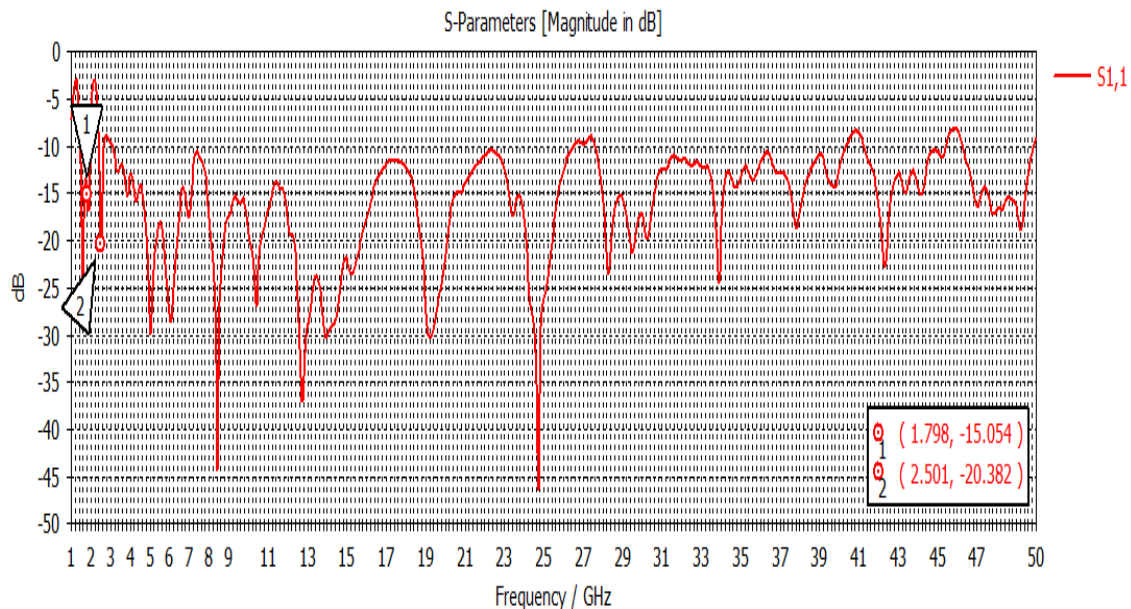


Figura D.1: Adaptación al puerto 1 del diseño de cuatro elementos

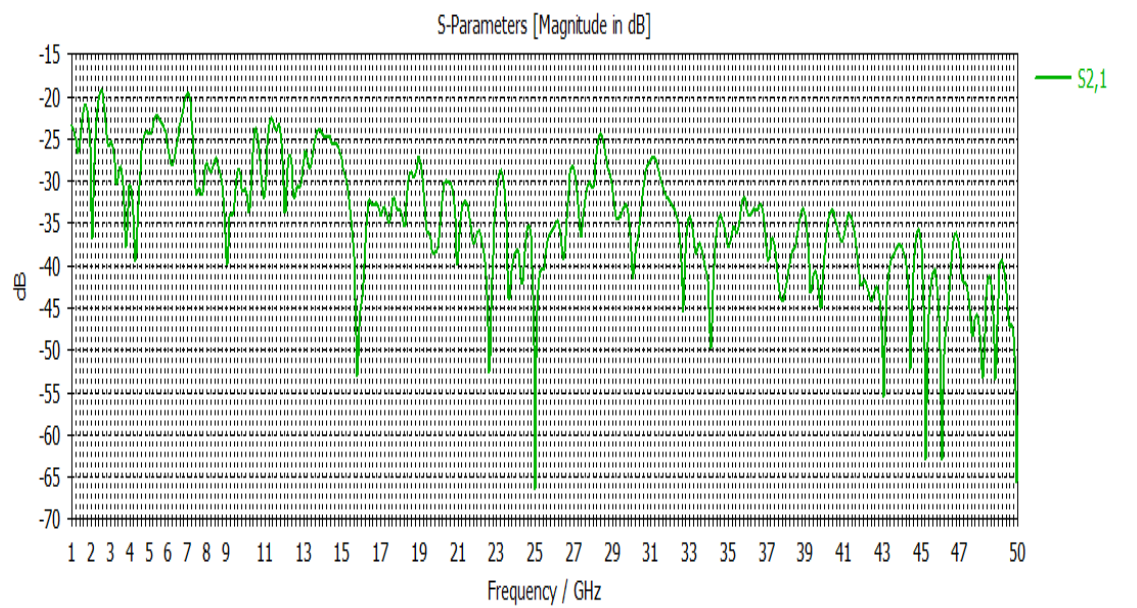


Figura D.2: Transmisión al puerto 1 del puerto 2 para diseño de cuatro elementos

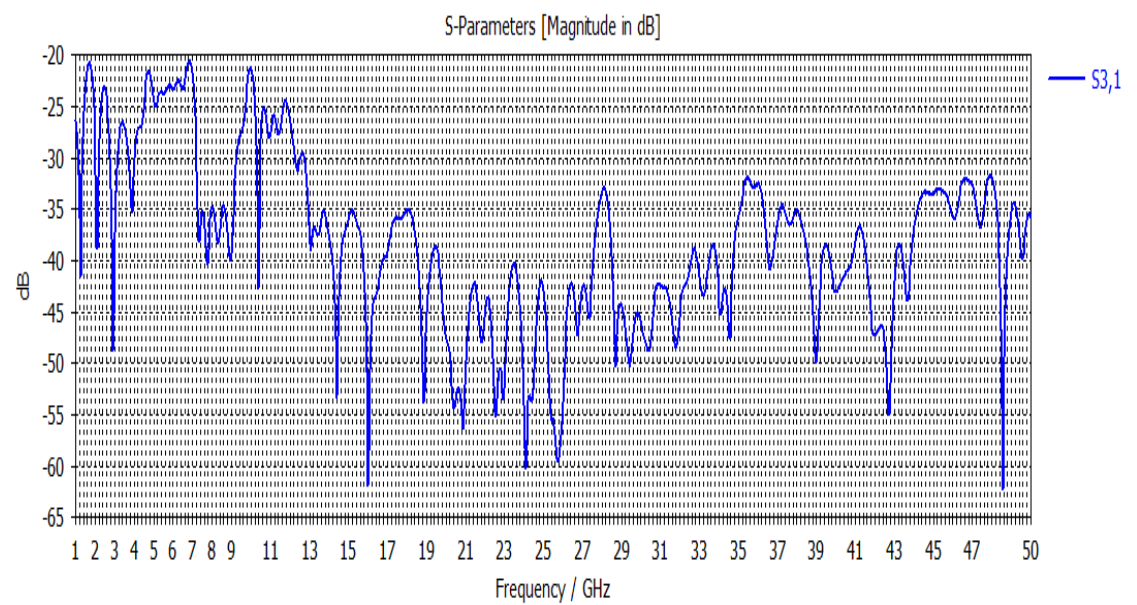


Figura D.3: Transmisión al puerto 1 del puerto 3 para diseño de cuatro elementos

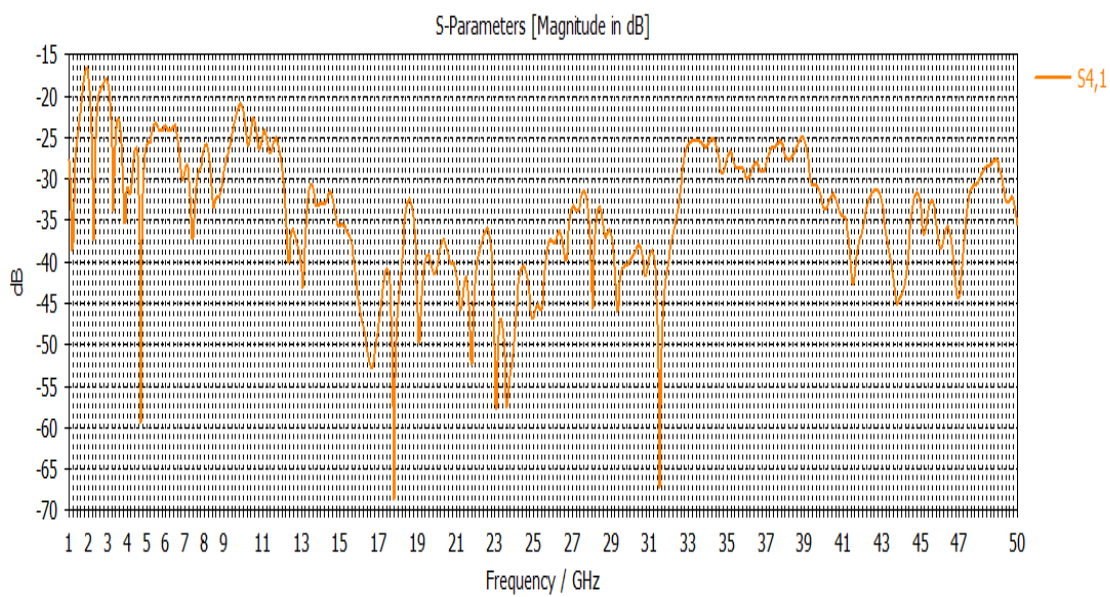


Figura D.4: Transmisión al puerto 1 del puerto 4 para diseño de cuatro elementos